

考虑专利许可及政府规制的再制造博弈^①

曹 柬, 赵韵雯, 吴思思, 张雪梅, 周根贵

(浙江工业大学管理学院, 杭州 310023)

摘要: 在第三方再制造商参与废旧产品的回收再制造活动时, 往往会涉及专利许可与政府规制问题. 构建了制造商与再制造商之间的动态博弈模型, 分别探讨了无专利许可无政府规制、有专利许可无政府规制、有专利许可有政府规制 3 种模式下企业的生产决策和再制造绩效水平. 研究发现, 以制造商主导的专利许可机制对再制造活动具有一定的抑制作用, 仅当再制造产业发展较为成熟时才能为制造商带来显著收益; 以政府主导的生产者责任延伸制度有利于促进再制造产业发展, 尤其在再制造业发展初期可有效提升产品回收再制造率, 并且该制度对再制造的促进作用与再制造带来的环境效益呈正相关. 研究结论对专利产品再制造过程中各企业的生产策略选择以及政府在再制造产业发展各阶段中财政政策的制定具有一定的参考价值.

关键词: 再制造; 生产者责任延伸; 专利许可; 动态博弈

中图分类号: F402 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2020)03-0001-23

0 引 言

为应对气候变化、工业污染、能源危机等一系列环境问题, 低碳经济这一可持续发展理念在各国逐步得到认可与推广. 再制造是发展低碳经济的重要途径之一. 在采用一系列高端技术对废旧产品修复改造后, 再制造产品(以下简称再制品)可获得与新产品近乎相同的质量与绩效水平^[1, 2]. 再制造能为企业节能降耗, 使其获得良好的环保声誉. 目前中国的再制造产业尚处于襁褓阶段, 如何推进再制造业快速、健康发展是我国学界、企业界以及政府正在考虑的问题. 在此背景下, 本文尝试研究以下问题: 1) 制造商为产品设置专利保护并向再制造商收取许可费是否有利于提升再制造绩效水平(例如产量、利润的增加)? 2) 在实施专利许可制度的情况下, 政府如何基于生产者责任延伸(extended producer responsibility,

EPR) 原则来制定财政手段以推进再制造产业可持续发展?

目前关于专利产品再制造许可的研究已取得不少成果, 主要有三方面: 1) 第三方再制造时再制造许可对企业决策的影响. 熊中凯等^[3]在原制造商许可第三方再制造的前提下, 分别探讨了双方在集中决策与分散决策下的最优策略, 设计了基于收益分享与成本分担的合作契约. 申成然等^[4]分析了无许可再制造与许可再制造两种策略, 得到原制造商和再制造商竞争情形下的最优定价决策. 许民利等^[5]研究了专利许可、低碳消费者比例以及再制品接受度与产品定价决策之间的关系. Zhang 和 Ren^[6]分别构建专利许可下的制造商与再制造商定价策略及合作协调机制. 2) 专利持有者不同专利许可策略的比较分析. 易余胤等^[7]探讨了再制造商负责回收再制造的固定专利许可费模式和单位产品专利许可费模式, 分

^① 收稿日期: 2018-01-09; 修订日期: 2019-03-15.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71874159; 71371169); 浙江省自然科学基金资助项目(LY18G020020).

作者简介: 曹 柬(1973—), 男, 浙江宁波人, 博士, 教授. Email: jcao@zjut.edu.cn

别得到在环境绩效、消费者福利、原制造商收益最大化视角下的最优模式选择. Hong 等^[8]研究得到制造商对专利单位许可费与固定许可费两种策略的选择取决于固定费阈值的设定. Chen 等^[9]针对由一个供应商与双寡头制造商构成的供应链系统,探讨了基于产品售价与基于原材料成本的两种专利许可策略的适用性. 3) 不同主体负责再制造的供应链成员最优策略选择. 熊中楷等^[10]构建了无再制造、原制造商再制造、许可第三方再制造三种模式的闭环供应链模型,得到仅当再制造商的生产成本较低时制造商会选择第三方再制造策略. 申成然等^[11]分别构建了制造商再制造与许可第三方再制造的博弈模型,提出成本节约是驱动再制造活动的最关键因素. Huang 等^[12]对比了制造商自行再制造、许可经销商再制造和许可第三方再制造等3种方案,得到不同的均衡策略,并提出信息共享可有效提升再制造绩效水平. Wu 和 Zhou^[13]研究发现,与再制品的政府统一定价策略比较,购买者定价策略下由第三方实施再制造有利于原制造商和再制造商双方收益以及社会总福利的提升. 此外,基于实践视角,目前部分品牌制造商所采用的专利授权模式已取得初步成效,例如国内的工程机械制造巨头三一重工、海外再制造的开创者彼得卡勒等公司,通过知识产权战略许可第三方再制造企业回收废旧产品进行再制造,并在上海临港、湖南浏阳等地协助推进再制造园区建设,由此获得可观收益.

关于政府运用规制手段推进再制造业发展的研究,主要集中在比较分析不同的规制手段与规制对象对企业策略选择与绩效水平的影响. Ma 等^[14]在双渠道闭环供应链模型中引入了政府消费补贴机制,对制造商与零售商在政府补贴前后的决策与收益情况作了比较分析. 张曙红等^[15]探讨了制造商、零售商在集中决策与分散决策模式下的差别定价策略,分析了政府奖惩机制对企业决策的影响. Wang 等^[16]研究了制造商与回收商之间的废弃电器电子产品(WEEE)回收责任分享机制,提出了激励回收的政府奖惩措施. 张汉江等^[17]建立了政府、制造商、再制造商以及回收商的三级供应链主从博弈模型,给出了再制造商对回收商的最优激励契约、以及政府对再制造活动的最优补贴策略. 赵敬华等^[18]探讨了混合回收渠

道下,政府的不同补贴对象对企业定价决策以及效益的影响. 夏西强等^[19]以“以旧换再”政策为背景,分别研究了政府是否采取补贴情形下制造商、再制造商与零售商的博弈模型. Heydari 等^[20]提出了结合新品折扣与废旧品回收费用补偿的合同机制以提高废旧品回收率,分析了政府规制(向供应链成员提供不同的激励措施)对企业收益与再制造绩效的改善作用. Murali 等^[21]分析了企业绿色标签制度与政府强制性环境规制对绿色产品(包括再制造产品)发展的影响,研究发现政府规制的是否实施与企业信誉度、消费者对第三方认证机构的信任度等因素相关. Zhang 等^[22]探讨了“以旧换再”活动中消费者购买行为与企业再制造效率对企业效益与环境绩效的影响,设计了政府线性税收/补贴机制以实现社会福利的最大化. Pazoki 和 Zaccou^[23]为政策制定者设计了决策模型,采用该模型可以求解不同环境政策下的补贴/惩罚均衡值,以最小化企业生产对环境的影响和最大化废旧产品的回收再制造率.

关于专利许可机制下推进再制造业发展的政府规制的研究还较少,这方面主要讨论了专利费用与政府补贴机制下的企业决策问题,目前尚未将生产者延伸责任(extended producer responsibility, EPR)制度纳入推进再制造发展的重要手段进行讨论. EPR 是指生产者应承担的责任不仅在产品的生产过程之中,还要延伸到产品的整个生命周期,特别是废弃后的回收和处置. EPR 作为一项重要的环境政策,往往需要政府推动和实施. 目前国际上实施 EPR 制度的惯用方式是:向生产者征收处理基金,补贴给回收处置废弃品的企业. 实践证实 EPR 制度对推动再制造业发展有较为显著的作用,例如 EPR 的实施使欧盟汽配市场再制品比例达到 55%. 申成然等^[24]考虑了专利保护市场下政府对不同对象的补贴机制,得出通过收益共享契约可有效改善供应链整体协调性. 朱庆华等^[25]建立了原制造商与第三方再制造商的竞争博弈模型,分析了专利费用、政府补贴对再制造绩效及环境效益的影响. 在这些研究基础上,结合目前我国在废弃电器电子产品处理领域正在推广的 EPR 制度,本文考虑将政府作为决策主体,针对一些适于进行再制造的大型产品(例如机床、工程机械、轨道交通以及军工设备等),政府同时

采取向再制造商支出补贴和向制造商征收税款的双向规制手段来推进再制造产业的可持续发展.

鉴于此, 本文结合 EPR 原则, 考虑将专利许可下政府规制手段扩展到税收/补贴方式, 分别建立了制造商与再制造商的自由竞争模型、制造商许可再制造商进行再制造的分散决策模型、以及政府在专利许可模式下的税收/补贴模型. 基于动态博弈理论分别求解各模型中制造商和再制造商的最优产量与定价决策, 并通过比较分析得到专利许可与 EPR 规制对再制造产业发展的作用. 希冀本文的研究工作能对推进我国再制造产业的规模化和规范化发展尽绵薄之力.

1 模型背景描述

1.1 模型框架

首先讨论由 1 个制造商 (M) 与 1 个再制造商 (R) 构成的 Stackelberg 博弈模型, 制造商生产新产品, 其产品废弃后由再制造商进行回收与再制造, 如图 1 模式 N (表示无专利许可、无政府规制) 所示. 然后考虑再制造商从制造商获得专利许可

并向其支付专利费进行再制造的情况, 如图 1 模式 P (有专利许可、无政府规制) 所示. 最后在专利许可情况下, 考虑政府 (G) 对制造商征税并补贴给再制造商, 如图 1 模式 PG (有专利许可、有政府规制) 所示.

作进一步说明. 首先, 制造商与再制造商进行产量博弈, 分别生产并向消费者出售新产品和再制品, 产品价格由市场决定. 然后, 在此基础上, 假定制造商生产专利产品, 制造商本身不进行产品再制造, 由再制造商对废旧产品进行回收和再制造, 再制造商需要向制造商申请专利许可, 每回收再制造一单位产品就需要支付一定的专利许可费用. 对比自由竞争与专利许可机制下的博弈模型, 可以分析得到专利许可费的存在对双方决策以及环境绩效的影响. 最后, 在专利许可机制下, 政府作为决策主体, 综合考虑废弃品的环境治理费用与再制造带来的环境效益等因素, 基于 EPR 原则, 政府的规制手段为: 对制造商征收税款, 对再制造商进行补贴. 通过与以上无政府规制模型的比较分析, 可以得到政府税收补贴机制对企业决策以及社会福利的影响.

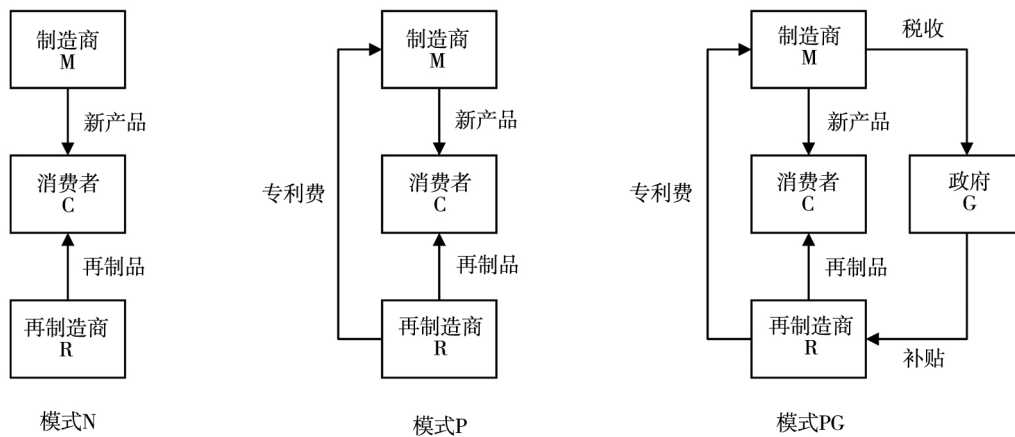


图 1 三种再制造博弈模型

Fig. 1 Three remanufacturing game models

1.2 参数和变量

参数及其含义

j : 三种再制造博弈模式 $j = N, P, PG$, 分别表示无专利许可无政府规制模式、有专利许可无政府规制模式、有专利许可有政府规制模式;

c_n : 新产品的单位生产成本;

c_r : 再制品的单位生产成本;

δ : 民众对再制品的接受程度 (也可以认为是再制品相对于新产品的价值折扣 $\delta \in (0, 1)$);

v : 生产单位再制品带来的环境效益溢出;

d : 处理单位报废品的环境治理费用 (由政府实施);

λ : 政府对单位再制品的补贴与政府对单位新产品的税收之间的比值 ($\lambda \geq 1$).

变量(包括目标函数)及其含义

p_n^j : 新产品的销售价格;

p_r^j : 再制品的销售价格;

Q_n^j : 新产品产量;

Q_r^j : 再制品产量;

Q^j : 新产品与再制品生产总量 $Q^j = Q_n^j + Q_r^j$;

τ^j : 废旧产品回收率(即再制品与新产品的产量比例 $\tau^j = Q_r^j/Q_n^j$ $\tau^j \in [0, 1]$);

θ^j : 生产单位再制品需支付的专利费用;

f : 政府对单位新产品的税收;

s : 政府对单位再制品的补贴 $s = \lambda f$;

π_M^j : 制造商的收益函数;

π_R^j : 再制造商的收益函数;

π_G^{PG} : 模式 PG 下政府的目标函数.

1.3 基本假设

1) 每件新产品在 1 个生命周期后将被回收再制造或作为废弃物被报废处理,而所有再制品在 1 个生命周期后将全部报废处理. 在每一周期中再制造商根据上一周期制造商的新产品生产情况确定再制品产量. 假设制造商与再制造商的产量决策已达到均衡状态,满足 $0 \leq Q_r \leq Q_n$, 产品回收率 τ ($\tau = Q_r/Q_n$) 保持不变.

2) 从再制造业起步直至发展成熟的各个阶段,基于再制品的接受度普遍低于新产品,以及生产过程中再制品的能源与原材料消耗远低于新产品,则新产品与再制品的销售价格和成本分别满足 $0 < p_r < p_n < 1$, $0 < c_r < c_n < 1$.

3) 在商品的价值判断上,消费者一般认为再制品质量及其性能难以完全达到新产品的水平,因此相对新产品而言再制品的接受度较低,即 $\delta \in (0, 1)$.

4) 忽略废旧产品损耗、不合规等因素,假设经再制造商回收的所有废旧产品都被用于再制造,即回收率与再制造率相等,为简化描述本文将回收再制造率等同表述为回收率.

5) 基于 EPR 原则,再制造商将代替制造商完成产品生命周期结束后的回收职责,且每个生产周期中再制品产量不大于新产品产量,因此为了更好地实现双方资金与职责的传递任务,政府对单位再制品的补贴不低于对单位新产品的税收,即 $\lambda \geq 1$.

6) v 反映了再制造商每生产单位再制品的环境效益产出; d 表示政府处理每单位报废品需要付出的环境治理成本,可以认为再制品和原制品的 d 值一致. 本文假设 $v > d$ 与 Kalimo^[26] 认为的 $v/d \geq 10$ 相符. 产业或产品不同 v 和 d 的取值也不同,例如,与家具行业比较,家电行业的 v, d 值显然更大; v, d 值的确定需要运用一定的经济统计方法^[26, 27].

7) 现实中专利许可收费一般采用二部制的方式,总费用为 $F + \theta Q_r$,其中 F 为固定费用 θ 为特许费率(即单位产品专利费). 假设 F 与其它决策变量(θ, Q_r, Q_n 等)是相互独立的,(这点与现实基本一致^[6, 7]). 由此,可以认为 F 是个常数. 为简化分析并为进一步聚焦特许费率 θ 的作用,本文假设 $F = 0$.

2 模型建立与求解

首先通过图 2 对本文讨论的产品生产、回收再制造与废弃物处理的过程进行说明.

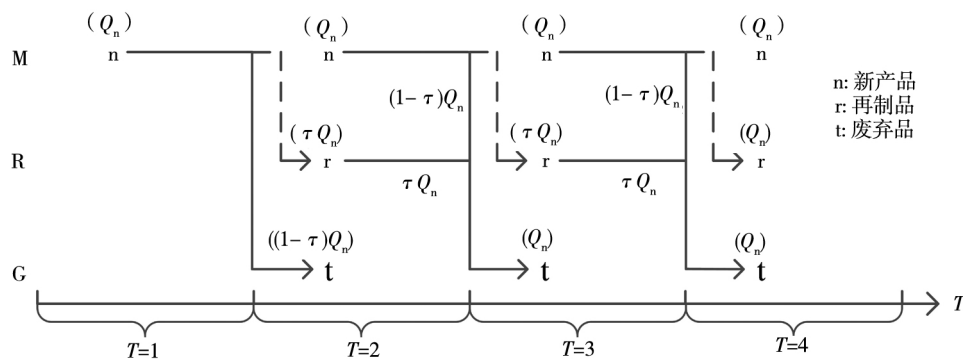


图 2 产品生产和废旧产品回收再制造过程

Fig. 2 Processes of product production, end-of-life product recycling and remanufacturing

在第一个周期开始时, 制造商 (M) 生产并售出新产品 Q_n 件. 这些产品在使用了一个周期后, 其中 τQ_n 件产品在第二个周期开始时被再制造商 (R) 回收再制造, 并作为再制品售出, 其余 $(1 - \tau) Q_n$ 件产品作为废弃物被报废处理, 由此带来的环境治理费用将由政府 (G) 承担; 同时制造商生产并售出新产品 Q_n 件. 第三个周期开始时制造商与再制造商将保持相同的生产决策, 且此后的每一周期均保持不变, 而需要报废处理的废弃物还将包括第二个周期结束后无法再次回收利用的 τQ_n 件再制品, 需要处理的总量增加至 Q_n 件. 从第四个周期开始报废品处理量也将保持在 Q_n 件, 且此后的每一周期均保持不变. 本文的求解过程针对保持稳定的第三及之后的每一生产周期, 其中两类产品的生产总量为 $Q = (1 + \tau) Q_n$ 件, $Q \in [Q_n, 2Q_n]$, 再制品占比为 $\tau / (1 + \tau)$.

基于制造商与再制造商之间的博弈关系, 本文借鉴 Ferrer 和 Swaminathan^[28] 的研究推导得到在再制品接受度 δ 的前提下, 总产量 Q 、新产品价格 p_n 与再制品价格 p_r 关于新产品需求 Q_n 与再制品需求 Q_r 的表达式(求解过程参见附录 A)

$$Q = Q_n + Q_r = 1 - \frac{p_r}{\delta} \quad (1)$$

$$p_n = 1 - Q_n - \delta Q_r \quad (2)$$

$$p_r = \delta(1 - Q_n - Q_r) \quad (3)$$

由式 (1) 可得: 当 $p_r > 0$, 总产量 $Q < 1$, 即市场处于不饱和状态. 此外, 定义新产品与再制品的价格差值为 Δp , $\Delta p = p_n - p_r = (1 - \delta)(1 - Q_n)$.

2.1 模式 N (无专利许可, 无政府规制)

制造商与再制造商的决策顺序为首先制造商确定新产品产量 Q_n^N , 然后再制造商作为跟随者, 根据 Q_n^N 确定再制品产量 Q_r^N ; 产品定价由双方的生产情况与再制品接受度确定, 如式 (2) 和式 (3) 所示. 双方的决策问题表示如下.

制造商的生产决策问题为

$$(P1): \max_{Q_n^N} \pi_M^N(Q_n^N) = (p_n^N - c_n) Q_n^N$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} Q_r^N \in \max \pi_R^N \\ p_n^N = 1 - Q_n^N - \delta Q_r^N \\ 0 \leq Q_r^N \leq Q_n^N \end{cases}$$

再制造商的生产决策问题为

$$(P2): \max_{Q_r^N} \pi_R^N(Q_r^N | Q_n^N) = (p_r^N - c_r) Q_r^N$$

$$\text{s. t. } p_r^N = \delta(1 - Q_n^N - Q_r^N)$$

根据逆向归纳法, 首先讨论再制造商的决策问题, 然后再分析制造商的新产品产量. 求解得到命题 1 (分析过程参见附录 B).

命题 1 在模式 N 下, 给定再制品接受度 δ 和新产品成本 c_n , 当再制品成本 c_r 在不同范围时, 企业均衡产量 Q_n^{N*} 和 Q_r^{N*} 、均衡定价 p_n^{N*} 和 p_r^{N*} 、以及总利润 π_M^{N*} 和 π_R^{N*} 等如表 1 所示.

表 1 模式 N 的求解结果

Table 1 Solutions to the model N

变 量	区间		
	(N-I)	(N-II)	(N-III)
c_r	(c_{r1}^N, c_n^N)	$(c_{r2}^N, c_{r1}^N]$	$(0, c_{r2}^N]$
Q_n^{N*}	$\frac{1 - c_n}{2}$	$\frac{c_r - 2c_n - \delta + 2}{2(2 - \delta)}$	$\frac{1 - c_n}{2(1 + \delta)}$
Q_r^{N*}	0	$\frac{2\delta c_n - (4 - \delta)c_r + \delta(2 - \delta)}{4\delta(2 - \delta)}$	$\frac{1 - c_n}{2(1 + \delta)}$
p_n^{N*}	$\frac{1 + c_n}{2}$	$\frac{2c_n + c_r - \delta + 2}{4}$	$\frac{1 + c_n}{2}$
p_r^{N*}	0	$\frac{2\delta c_n + (4 - 3\delta)c_r + \delta(2 - \delta)}{4(2 - \delta)}$	$\frac{\delta(\delta + c_n)}{1 + \delta}$
π_M^{N*}	$\frac{(1 - c_n)^2}{4}$	$\frac{(c_r - 2c_n - \delta + 2)^2}{8(2 - \delta)}$	$\frac{(1 - c_n)^2}{4(1 + \delta)}$
π_R^{N*}	0	$\frac{[2\delta c_n - (4 - \delta)c_r + \delta(2 - \delta)]^2}{16\delta(2 - \delta)^2}$	$\frac{(1 - c_n)[\delta(\delta + c_n) - (1 + \delta)c_r]}{2(1 + \delta)^2}$
τ^{N*}	0	$\frac{2\delta c_n - (4 - \delta)c_r + \delta(2 - \delta)}{2\delta(c_r - 2c_n - \delta + 2)}$	1

注: $c_{r1}^N = \frac{\delta(2c_n - \delta + 2)}{4 - \delta}$, $c_{r2}^N = \max\left\{0, \frac{\delta(6c_n + \delta - 2)}{4 + \delta}\right\}$.

由表 1 可知: 在区间 (N-I), 回收率 $\tau_1^{N*} = 0$ (变量及函数中的下标 I、II、III 分别对应成本区间 (N-I)、成本区间 (N-II)、成本区间 (N-III), 不同模式采用类似表示), 再制造商不进行回收再制造; 在区间 (N-II), $\tau_2^{N*} \in (0, 1)$, 再制造商回收部分已使用了一个周期的废旧产品进行再制造, 每一周期中的新产品产量大于再制品产量; 在区间 (N-III), $\tau_3^{N*} = 1$, 再制造商回收再制造所有上一周期中制造商生产销售的

产品,此时每一周期中的新产品产量与再制品产量相等.

如果以产品回收再制造率为依据划分再制造产业的发展情况,不妨可以将 $\tau = 0$ 看作再制造产业尚未发展阶段或孵化期, $\tau \in (0, 1)$ 为再制造产业的萌芽期和发展期(τ 越大,发展越好), $\tau = 1$ 为再制造产业的成熟期. 需要指出的是,再制造产业的发展程度主要取决于由技术进步带来的成本下降,同时也与消费者环保意识等因素有关,本文中仅考虑成本因素对产业发展程度的影响;此外,为方便阅读和理解,本文中区间(N - I)、区间(N - II)、区间(N - III)的再制造成本是依次下降的,以此与再制造产业的孵化、发展、成熟期相对应.

对命题1中不同成本区间下的均衡解作比较分析,得到推论1.

推论1 关于制造商

- 1) 当 $c_r \in \left[\delta c_n, \frac{3\delta c_n - \delta(2 - \delta)}{1 + \delta} \right]$ 时, $Q_{n,I}^{N*} \geq Q_{n,II}^{N*} \geq Q_{n,III}^{N*}$;
- 2) $p_{n,I}^{N*} = p_{n,III}^{N*} \geq p_{n,II}^{N*}$;
- 3) 当 $1 \leq \frac{2(2 - \delta)(1 - c_n)^2}{(c_r - 2c_n - \delta + 2)^2} \leq 1 + \delta$ 时, $\pi_{M,I}^{N*} \geq \pi_{M,II}^{N*} \geq \pi_{M,III}^{N*}$.

关于再制造商

- 1) 当 $c_r \in \left[\frac{6\delta c_n + \delta(3 - \delta)\delta - 2\delta}{4 + \delta(3 - \delta)}, \frac{2\delta c_n + \delta(2 - \delta)}{4 - \delta} \right]$ 时, $Q_{r,II}^{N*} \leq Q_{r,III}^{N*}$;
- 2) 当 $c_r \geq \frac{6\delta(1 - \delta)c_n - 3\delta^3 - \delta(2 - 7\delta)}{4 + \delta - 3\delta^3}$ 时, $p_{r,II}^{N*} \geq p_{r,III}^{N*}$.

由推论1可知,在模式N下,随着再制造产业的发展,在一定条件下,制造商的新产品产量 Q_n^{N*} 不断下降,价格 p_n^{N*} 呈先降后升的趋势,利润 π_M^{N*} 不断下降;再制造商的产量 Q_r^{N*} 不断增加,价格 p_r^{N*} 不断下降. 显然,无专利许可保护的自由竞争模式对制造商不利,而再制造商的利润变化趋势不确定. 基于命题1,进一步分析主要参数对决策变量及利润的影响得到推论2.

推论2 在模式N下,参数与变量及利润函

数的相关性总结如表2所示.

表2 模式N参数与变量及利润函数的关系

Table 2 Relationship between parameters and variables, objective functions of model N

变量	区间								
	N - I			N - II			N - III		
	参数								
	c_n	c_r	δ	c_n	c_r	δ	c_n	c_r	δ
Q_n^{N*}	-	/	/	-	+	-	-	/	-
Q_r^{N*}	/	/	/	+	-	+	-	/	-
Q^{N*}	-	/	/	-	-	±	-	/	-
p_n^{N*}	+	/	/	+	+	-	+	/	/
p_r^{N*}	/	/	/	+	+	+	+	/	+
$\Delta\rho^{N*}$	/	/	/	+	-	-	+	/	-
π_M^{N*}	-	/	/	-	+	-	-	/	-
π_R^{N*}	/	/	/	+	-	+	±	-	+
τ^{N*}	/	/	/	+	-	+	/	/	/

注:“+”表示变量与参数正相关,“-”表示变量与参数负相关,“±”表示变量与参数关系不确定,“/”表示变量与参数不相关.

由推论2得到:1)当再制品成本位于区间(N - II)时(即再制造产业进入萌芽和发展期),随着新产品成本 c_n 的增加,再制品产量 $Q_{r,II}^{N*}$ 、价格 $p_{r,II}^{N*}$ 、回收率 τ_{II}^{N*} 均提升;随着再制品成本 c_r 的增加,再制品产量 $Q_{r,II}^{N*}$ 下降、价格 $p_{r,II}^{N*}$ 上升,回收率 τ_{II}^{N*} 及再制造商利润 $\pi_{R,II}^{N*}$ 均下降;随着再制品民众接受度 δ 的增加,新产品产量 Q_n^{N*} 减少,再制品产量 $Q_{r,II}^{N*}$ 、再制品价格 $p_{r,II}^{N*}$ 、回收率 τ_{II}^{N*} 及再制造商利润 $\pi_{R,II}^{N*}$ 均上升,制造商利润 π_M^{N*} 下降;2)当再制品成本位于区间(N - III)时(即产业进入成熟期),随着 c_n 的增加,产量 Q_n^{N*} 、 $Q_{r,III}^{N*}$ 均下降,价格 p_n^{N*} 和 $p_{r,III}^{N*}$ 均上升;随着 δ 的增加,新产品和再制品产量 Q_n^{N*} 、 $Q_{r,III}^{N*}$ 反而下降,但再制品价格 $p_{r,III}^{N*}$ 增加,由此保证了再制造商利润 $\pi_{R,III}^{N*}$ 的增加.

再制造成本的不断降低显然能够提升废旧产品的回收率以及再制造商利润,而消费者环保意识的不断增加虽然能保证再制造商利润的小幅增加,但在再制造产业处于成熟阶段时却不能保障消费者福利的提升.

进一步分析推论1和推论2,基于企业运营决策视角,得到如下结论.

结论 1 在制造商与再制造商处于无专利许可、无政府规制的自由竞争情形下:

1) 当再制造产业进入萌芽和发展期,再制造商选择回收部分废旧产品进行再制造,制造商的新产品产量越大,再制品产量相对越小.随着再制品对消费者吸引力的不断提升,再制造商将提高再制品定价,制造商通过采用减量降价的策略,限制再制造商的生产规模,维持其市场主导地位.

2) 当再制造产业进入成熟阶段,再制造商选择回收所有废旧产品进行再制造.当再制品接受度与新产品生产成本较高时,再制造商将采用更高的定价策略.此时,面对再制品对消费者吸引力的提升,制造商将减小新产品产量,缩小生产规模,并依据新产品成本做出定价决策,此时再制品产量也会下降.

综合而言,在制造商与再制造商自由竞争情形下,随着再制造产业的发展,再制造成本的不断降低显然有利于再制造商进入再制品市场,但制造商会采取降低新产品产量和价格的策略予以应对;再制品接受度的不断提高在推动更多消费者倾向购买再制品的同时,也会导致两类产品总产量降低从而使得消费者整体福利也下降.

2.2 模式 P (有专利许可,无政府规制)

考虑制造商的产品涉及专利保护,再制造商再制造每单位专利产品需要向制造商支付一定的专利费用.双方的决策顺序如下:制造商首先确定专利费 θ^P ,然后根据公布的 θ^P 确定新产品产量 Q_n^P ;最后再制造商确定再制品产量 Q_r^P .

制造商的制定专利费问题为

$$(P3): \max_{\theta^P} \pi_M^P(\theta^P) = (p_n^P - c_n) Q_n^P + \theta^P Q_r^P$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} Q_r^P \in \max \pi_R^P \\ Q_n^P \in \max \pi_M^P \\ p_n^P = 1 - Q_n^P - \delta Q_r^P \\ 0 \leq \theta^P \end{cases}$$

制造商的生产决策问题为

$$(P4): \max_{Q_r^P} \pi_M^P(Q_n^P | \theta^P) = (p_n^P - c_n) Q_n^P + \theta^P Q_r^P$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} Q_r^P \in \max \pi_R^P \\ p_n^P = 1 - Q_n^P - \delta Q_r^P \\ 0 \leq Q_r^P \leq Q_n^P \end{cases}$$

再制造商的生产决策问题为

$$(P5): \max_{Q_r^P} \pi_R^P(Q_r^P | Q_n^P, \theta^P) = (p_r^P - c_r - \theta^P) Q_r^P$$

$$\text{s. t. } p_r^P = \delta(1 - Q_n^P - Q_r^P)$$

同理,采用逆向归纳法分析上述规划问题得到命题 2,求解过程参见附录 C.

命题 2 在模式 P 下,企业决策变量、利润、回收率与再制品成本的关系如表 3 所示.

表 3 模式 P 的求解结果
Table 3 Solutions to the model P

变量	区间		
	(P-I)	(P-II)	(P-III)
c_r	(c_{r1}^P, c_n)	$(c_{r2}^P, c_{r1}^P]$	$(0, c_{r2}^P]$
Q_n^{P*}	$\frac{1-c_n}{2}$	$\frac{c_r-2c_n-\delta+2}{2(2-\delta)}$	$\frac{1+\delta-c_n-c_r}{2+5\delta}$
Q_r^{P*}	0	$\frac{\delta c_n - c_r}{2\delta(2-\delta)}$	$\frac{1+\delta-c_n-c_r}{2+5\delta}$
θ^{P*}	0	$\frac{\delta - c_r}{2}$	$\frac{3\delta c_n - 2(1+\delta)c_r + \delta(2\delta-1)}{2+5\delta}$
p_n^{P*}	$\frac{1+c_n}{2}$	$\frac{1+c_n}{2}$	$\frac{(1+\delta)(c_n+c_r)-\delta^2+3\delta+1}{2+5\delta}$
p_r^{P*}	0	$\frac{\delta c_n + (1-\delta)c_r + \delta(2-\delta)}{2\delta(2-\delta)}$	$\frac{\delta(3\delta+2c_n+2c_r)}{2+5\delta}$
π_M^{P*}	$\frac{(1-c_n)^2}{4}$	$\frac{A_2}{4\delta(2-\delta)}$	$\frac{(1+\delta)(1+\delta-c_n-c_r)^2}{(2+5\delta)^2}$
π_R^{P*}	0	$\frac{(\delta c_n - c_r)^2}{4\delta(2-\delta)^2}$	$\frac{\delta(1+\delta-c_n-c_r)^2}{(2+5\delta)^2}$
τ^{P*}	0	$\frac{\delta c_n - c_r}{\delta(c_r - 2c_n - \delta + 2)}$	1

注: $c_{r1}^P = \frac{\delta(2c_n - \delta + 2)}{4 - \delta}$, $c_{r2}^P = \max\left\{0, \frac{\delta(3c_n + 2\delta - 1)}{2 + 2\delta}\right\}$,

$A_2 = \delta(1+c_n-2c_r)(2-\delta+c_r-2c_n) + (\delta-c_r)(\delta c_n - c_r)$.

对命题 2 中不同成本区间下的均衡解作比较分析,得到推论 3.

推论 3 关于制造商

1) 当 $c_r \in \left[\delta c_n, \frac{4\delta c_n - \delta(2-\delta)}{2+\delta}\right]$ 时, $Q_{n,I}^{P*} \geq$

$Q_{n,II}^{P*} \geq Q_{n,III}^{P*}$;

2) 当 $c_r \leq \frac{3\delta c_n - \delta(1-2\delta)}{2(1+\delta)}$ 时, $p_{n,I}^{P*} = p_{n,II}^{P*} \geq$

$p_{n,III}^{P*}$, 反之则 $p_{n,I}^{P*} = p_{n,II}^{P*} \leq p_{n,III}^{P*}$.

关于再制造商

1) 当 $c_r \in \left[\frac{3\delta(2+\delta)c_n - 2\delta^2(1-\delta) - 4\delta}{2\delta^2 + \delta + 2}, \delta c_n\right]$ 时,

$Q_{r,II}^{P*} \leq Q_{r,III}^{P*}$;

2) 当 $c_r \leq \frac{\delta(4\delta^2 - 3\delta + 2)c_n + 4\delta - \delta^2(17\delta - 6\delta^2 - 8)}{\delta^2(13 - 4\delta) - 3\delta - 2}$

时, $p_{r,II}^{P*} \leq p_{r,III}^{P*}$, 反之则 $p_{r,II}^{P*} \geq p_{r,III}^{P*}$;

$$3) \text{ 当 } c_r \geq \frac{3\delta(2+\delta)c_n - 2\delta^2(1-\delta) - 4\delta}{2\delta^2 + \delta + 2},$$

$$\pi_{R,II}^{P^*} \leq \pi_{R,III}^{P^*}.$$

关于专利费

$$\text{当 } c_r \leq \frac{6\delta c_n - \delta(4+\delta)}{2-\delta} \text{ 时, } \theta_{II}^{P^*} \leq \theta_{III}^{P^*} \text{ 反之}$$

$$\text{则 } \theta_{II}^{P^*} \geq \theta_{III}^{P^*}.$$

在模式 P 下,随着再制造产业的发展,在一定条件下新产品产量 $Q_n^{P^*}$ 不断下降,价格 $p_n^{P^*}$ 变化趋势与再制品成本区间相关(在低成本区间,满足 $p_{n,I}^{P^*} = p_{n,II}^{P^*} \geq p_{n,III}^{P^*}$;在高成本区间 $p_{n,I}^{P^*} = p_{n,II}^{P^*} \leq p_{n,III}^{P^*}$),由此制造商利润变化趋势不确定;而再制品产量 $Q_r^{P^*}$ 不断增加,价格 $p_r^{P^*}$ 与成本区间相关(在低成本区间 $p_{r,II}^{P^*} \leq p_{r,III}^{P^*}$;在高成本区间 $p_{r,II}^{P^*} \geq p_{r,III}^{P^*}$),一定条件下再制造商利润 $\pi_R^{P^*}$ 不断增加.单位专利费 θ^{P^*} 的变化趋势也与成本区间相关(在低成本区间 $\theta_{II}^{P^*} \leq \theta_{III}^{P^*}$;在高成本区间 $\theta_{II}^{P^*} \geq \theta_{III}^{P^*}$).简而言之,在模式 P 下,制造商会根据再制品成本状况调整专利费用;但企业利润(尤其是制造商)不确定,对此将在第 3 节“数值分析”中作进一步讨论.

基于命题 2 进一步分析参数与决策变量及利润的关系,得到推论 4.

推论 4 在模式 P 下,参数与决策变量及利润函数的相关性总结如表 4 所示.

表 4 模式 P 参数与变量及利润函数的关系

Table 4 Relationship between parameters and variables, objective functions of model P

变量	区间								
	P - I			P - II			P - III		
	参数								
	c_n	c_r	δ	c_n	c_r	δ	c_n	c_r	δ
θ^{P^*}	/	/	/	/	-	+	+	-	±
$Q_n^{P^*}$	-	/	/	-	+	-	-	-	±
$Q_r^{P^*}$	/	/	/	+	-	+	-	-	±
Q^{P^*}	-	/	/	-	-	-	-	-	±
$p_n^{P^*}$	+	/	/	+	/	/	+	+	±
$p_r^{P^*}$	/	/	/	+	+	±	+	+	+
Δp^{P^*}	/	/	/	+	-	-	+	+	-
$\pi_M^{P^*}$	-	/	/	-	±	-	-	-	+
$\pi_R^{P^*}$	/	/	/	+	-	±	-	-	±
τ^{P^*}	/	/	/	+	-	+	/	/	/

注：“+”表示变量与参数正相关，“-”表示变量与参数负相关；“±”表示变量与参数关系不确定，“/”表示变量与参数不相关.

由推论 4 可知: 1) 当再制品成本位于区间 (P - II) 时(即再制造产业进入萌芽和发展期),随着新产品成本 c_n 增加,再制品产量 $Q_{r,II}^{P^*}$ 、价格 $p_{r,II}^{P^*}$ 、再制造商利润 $\pi_{R,II}^{P^*}$ 、回收再制造率 $\tau_{II}^{P^*}$ 均上升,总产量 $Q_{II}^{P^*}$ 减少;随着再制品成本 c_r 增加,再制品产量 $Q_{r,II}^{P^*}$ 下降、价格 $p_{r,II}^{P^*}$ 上升,总产量 $Q_{II}^{P^*}$ 、回收率 $\tau_{II}^{P^*}$ 、再制造商利润 $\pi_{R,II}^{P^*}$ 、以及单位专利费 $\theta_{II}^{P^*}$ 均下降;随着再制品接受度 δ 增加,再制品产量 $Q_{r,II}^{P^*}$ 上升,新产品产量 $Q_{n,II}^{P^*}$ 、总产量 $Q_{II}^{P^*}$ 以及制造商利润 $\pi_{M,II}^{P^*}$ 均下降,回收率 $\tau_{II}^{P^*}$ 显著提升,但再制品价格 $p_{r,II}^{P^*}$ 变化趋势不确定且专利费 $\theta_{II}^{P^*}$ 增加,由此导致再制造商利润变化趋势不确定. 2) 当再制造成本位于区间 (P - III) 时(即产业进入成熟期),随着 c_n 或 c_r 增加,产量 $Q_{n,III}^{P^*}$ 、 $Q_{r,III}^{P^*}$ 均减少,价格 $p_{n,III}^{P^*}$ 和 $p_{r,III}^{P^*}$ 均增加,然而企业利润 $\pi_{M,III}^{P^*}$ 和 $\pi_{R,III}^{P^*}$ 均下降;随着 δ 的提升,再制品价格 $p_{r,III}^{P^*}$ 上升,制造商利润 $\pi_{M,III}^{P^*}$ 增加,而再制造商利润变化趋势不确定.

结合命题 1 和命题 2,对模式 N 和模式 P 的企业决策变量及目标利润进行比较分析得到推论 5.

推论 5 1) 再制造产业处于未发展阶段或孵化期(区间 I). 模式 N 和模式 P 中的均衡解是一致的.

2) 再制造产业处于萌芽期和发展期(区间 II). 对于制造商, $Q_{n,II}^{N^*} = Q_{n,II}^{P^*}$ 、 $p_{n,II}^{N^*} \leq p_{n,II}^{P^*}$ 、当 $c_r \leq \frac{2\sqrt{\delta[4c_n + \delta - 6] - c_n(6 + c_n) + 8} - 4c_n(1 - c_n) + 3\delta(2c_n + \delta - 2)}{5\delta - 2}$

时, $\pi_{M,II}^{N^*} \leq \pi_{M,II}^{P^*}$, 反之则 $\pi_{M,II}^{N^*} \geq \pi_{M,II}^{P^*}$; 对于再制造商, $Q_{r,II}^{N^*} \geq Q_{r,II}^{P^*}$, 当 $c_r \leq \frac{2\delta(1-\delta)c_n + 4\delta - (4-\delta)\delta^2}{3\delta(2-\delta) - 2}$

时, $p_{r,II}^{N^*} \leq p_{r,II}^{P^*}$, 反之则 $p_{r,II}^{N^*} \geq p_{r,II}^{P^*}$, 当 $c_r \in (0, \delta]$ 时, $\pi_{R,II}^{N^*} \geq \pi_{R,II}^{P^*}$, 当 $c_r \in [\delta, c_n)$ 时, $\pi_{R,II}^{N^*} \leq \pi_{R,II}^{P^*}$.

3) 再制造产业进入成熟期(区间 III). 当 $c_r \leq \frac{2\delta^2 + 3\delta c_n - \delta}{2(1 + \delta)}$, 有 $Q_{n,III}^{N^*} \leq Q_{n,III}^{P^*}$, $Q_{r,III}^{N^*} \leq Q_{r,III}^{P^*}$, $p_{n,III}^{N^*} \geq p_{n,III}^{P^*}$, $p_{r,III}^{N^*} \geq p_{r,III}^{P^*}$, $\pi_{M,III}^{N^*} \leq \pi_{M,III}^{P^*}$, $\pi_{R,III}^{N^*} \geq \pi_{R,III}^{P^*}$; 当 $c_r \geq \frac{2\delta^2 + 3\delta c_n - \delta}{2(1 + \delta)}$, 则 $Q_{n,III}^{N^*} \geq Q_{n,III}^{P^*}$,

$$Q_{r,III}^{N^*} \geq Q_{r,III}^{P^*}, p_{n,III}^{N^*} \leq p_{n,III}^{P^*}, p_{r,III}^{N^*} \leq p_{r,III}^{P^*}, \pi_{M,III}^{N^*} \geq \pi_{M,III}^{P^*}, \pi_{R,III}^{N^*} \leq \pi_{R,III}^{P^*}.$$

由推论 5, 当再制造产业处于发展期, 两种模式中的制造商产量是一致的, 当再制品成本相对较低时, 模式 P 的制造商利润更高一些; 对于再制造商而言, 模式 P 的产量更低. 当产业进入成熟期, 在再制品成本较低的情况下, 相对于模式 N, 虽然模式 P 的总产量更高, 制造商利润也更高, 但再制造商利润更低.

基于推论 3 至推论 5, 对模式 P 中专利许可机制与生产成本对企业决策的影响总结如下.

结论 2 在制造商与再制造商的决策博弈处于有专利许可、无政府规制的情形下:

1) 当再制造产业处于萌芽和发展期、再制品对消费者吸引力较强时, 制造商一味扩大生产将导致市场挤兑效应, 因此可适度缩小生产规模, 通过提高专利费用手段分享再制造获得的收益. 于是随着再制品接受度的提升, 新产品产量降低, 再制品产量也随之下降, 因此专利保护的存在阻碍再制造的发展.

2) 当产业逐渐步入成熟期, 随着再制造成本的不断降低, 再制造商将回收再制造所有废旧产品. 此时, 随着新产品与再制品生产成本的降低, 制造商与再制造商都将提高产量并降低定价; 单位产品的制造成本越高, 再制造成本越低, 制造商收取的专利费用就越高.

简而言之, 与模式 N 相比, 模式 P 中专利许可机制的存在, 有利于制造商攫取更多收益, 但不利于扩大再制造商生产规模, 尤其当再制造产业处于萌芽和不完善阶段时将阻碍该产业的进一步发展.

2.3 模式 PG(有专利许可, 有政府规制)

在模式 PG 下, 制造商通过许可再制造商的回收再制造活动和对政府缴纳税款间接地履行生产者责任; 再制造商通过政府获得一定的回收再制造补贴, 代替制造商履行后续责任. 制造商每生产 1 单位新产品需向政府缴纳税收 f , 再制造商每生产 1 单位再制品可获得政府补贴 s ($s = \lambda f, \lambda \geq 1$). 政府的目标函数由 4 部分组成: 再制造带来

的环境溢出、报废产品的环境治理成本、制造商缴纳的税收和对再制造商的补贴. 在模式 PG 中, 首先由政府确定单位新产品的税收额 f 与单位再制品的补贴额 s ; 接着制造商确定专利费 θ^{PG} , 然后确定新产品产量 Q_n^{PG} ; 最后再制造商确定再制品产量 Q_r^{PG} . 政府与各企业的决策问题如下.

政府的税收及补贴问题为

$$(P6): \max_f \pi_G^{PG}(f) = vQ_r^{PG} - dQ_n^{PG} - \lambda fQ_r^{PG} + fQ_n^{PG}$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} Q_r^{PG} \in \max \pi_R^{PG} \\ Q_n^{PG} \in \max \pi_M^{PG} \\ 0 \leq f \end{cases}$$

制造商的专利问题为

$$(P7): \max_{\theta^{PG}} \pi_M^{PG}(\theta^{PG} | f) = (p_n^{PG} - c_n - f)Q_n^{PG} + \theta^{PG}Q_r^{PG}$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} Q_r^{PG} \in \max \pi_R^{PG} \\ Q_n^{PG} \in \max \pi_M^{PG} \\ p_n^{PG} = 1 - Q_n^{PG} - \delta Q_r^{PG} \\ 0 \leq \theta^{PG} \end{cases}$$

制造商的生产决策问题为

$$(P8): \max_{Q_n^{PG}} \pi_M^{PG}(Q_n^{PG} | \theta^{PG}, f) = (p_n^{PG} - c_n - f)Q_n^{PG} + \theta^{PG}Q_r^{PG}$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} Q_r^{PG} \in \max \pi_R^{PG} \\ p_n^{PG} = 1 - Q_n^{PG} - \delta Q_r^{PG} \\ 0 \leq Q_r^{PG} \leq Q_n^{PG} \end{cases}$$

再制造商的生产决策问题为

$$(P9): \max_{Q_r^{PG}} \pi_R^{PG}(Q_r^{PG} | Q_n^{PG}, \theta^{PG}, f) = (p_r^{PG} + \lambda f)Q_r^{PG} - (c_r + \theta^{PG})Q_r^{PG}$$

$$\text{s. t. } p_r^{PG} = \delta(1 - Q_n^{PG} - Q_r^{PG})$$

采用逆向归纳法求解上述规划问题得到命题 3, 求解过程参见附录 D.

命题 3 在模式 PG 下, 制造商的均衡专利费用 θ^{PG^*} 、产量 $Q_n^{PG^*}$ 和 $Q_r^{PG^*}$ 、定价 $p_n^{PG^*}$ 和 $p_r^{PG^*}$ 、利润 $\pi_M^{PG^*}$ 和 $\pi_R^{PG^*}$ 以及政府的均衡税收 f^* 与再制品成本 c_r 的关系如表 5 所示.

表5 模式PG的求解结果
Table 5 Solutions to the model PG

变量	区间		
	(PG - I)	(PG - II)	(PG - III)
c_r	(C, ϵ_n)	$(\min\{c_{r2}^{PG}, \epsilon_n\}, \min\{c_{r4}^{PG}, \epsilon_n\})$	$(c_{r1}^{PG}, \min\{c_{r2}^{PG}, c_{r3}^{PG}, \epsilon_n\})$
Q_n^{PG*}	$\frac{1 - c_n - d}{2}$	$\frac{-(\lambda + 2)f_{II}^* - 2c_n + c_r + 2 - \delta}{2(2 - \delta)}$	$\frac{-(\lambda + 2)f_{III}^* - 2c_n + c_r + 2 - \delta}{2(2 - \delta)}$
Q_r^{PG*}	0	$\frac{(2\delta + 4\lambda - \lambda\delta)f_{II}^* + 2\delta c_n - (4 - \delta)c_r + \delta(2 - \delta)}{4\delta(2 - \delta)}$	$\frac{(\lambda + \delta)f_{III}^* + \delta c_n - c_r}{2\delta(2 - \delta)}$
θ^{PG*}	0	0	$\frac{\lambda f_{III}^* - c_r + \delta}{2}$
f^*	$\frac{1 - c_n + d}{2}$	f_{II}^*	f_{III}^*
p_n^{PG*}	$\frac{3 + c_n + d}{4}$	$\frac{(2 - \lambda)f_{II}^* + 2c_n + c_r - \delta + 2}{4}$	$\frac{1 + c_n + f_{III}^*}{2}$
p_r^{PG*}	0	$\frac{(3\delta\lambda + 2\delta - 4\lambda)f_{II}^* + 2\delta c_n + (4 - 3\delta)c_r + \delta(2 - \delta)}{4(2 - \delta)}$	$\frac{\delta[\delta c_n + (1 - \delta)c_r + (2 - \delta)^2 + (\delta\lambda + \delta - \lambda)f_{III}^*]}{4 - 2\delta}$
π_M^{PG*}	$\frac{(1 - c_n)^2}{4}$	$\frac{[c_r - 2c_n - \delta + 2 - (\lambda + 2)f_{II}^*]^2}{8(2 - \delta)}$	$\frac{(1 - c_n - f_{III}^*) [c_r - 2c_n - \delta + 2 - (\lambda + 2)f_{III}^*]}{4(2 - \delta)}$
π_R^{PG*}	0	$\frac{K[K - 8\lambda(2 - \delta)f_{II}^*]}{16\delta(2 - \delta)^2}$	$\frac{\delta c_n - c_r + (\lambda + \delta)f_{III}^*}{4\delta(2 - \delta)^2} \{ \delta(2 - \delta)^2 + \delta^2 c_n - c_r(\delta^2 - 3\delta + 4) + [(\lambda + 1)\delta^2 - 2\lambda\delta + 4\lambda]f_{III}^* \}$
τ^{PG*}	0	$\frac{(2\delta + 4\lambda - \lambda\delta)f_{II}^* + 2\delta c_n - (4 - \delta)c_r + \delta(2 - \delta)}{2\delta[-(\lambda + 2)f_{II}^* - 2c_n + c_r + 2 - \delta]}$	$\frac{(\lambda + \delta)f_{III}^* + \delta c_n - c_r}{\delta[-(\lambda + 2)f_{III}^* - 2c_n + c_r + 2 - \delta]}$
变量	区间		
	(PG - IV)	(PG - V)	(PG - VI)
c_r	$(\min\{\frac{\delta(c_n + \delta)}{1 + \delta}, \epsilon_{r1}^{PG}\}, \epsilon_{r1}^{PG})$	$(\max\{0, \frac{\delta(3c_n + 2\delta - 1)}{2 + 2\delta}\}, \min\{\frac{\delta(c_n + \delta)}{1 + \delta}, \epsilon_{r1}^{PG}\})$	$(0, \max\{0, \frac{\delta(3c_n + 2\delta - 1)}{2 + 2\delta}\})$
Q_n^{PG*}	$\frac{\delta + \lambda - \lambda c_n - c_r}{2(\delta + \lambda + \lambda\delta)}$	$\frac{1 - c_n}{2(1 + \delta)}$	$\frac{1 + \delta - c_n - c_r}{2 + 5\delta}$
Q_r^{PG*}	$\frac{\delta + \lambda - \lambda c_n - c_r}{2(\delta + \lambda + \lambda\delta)}$	$\frac{1 - c_n}{2(1 + \delta)}$	$\frac{1 + \delta - c_n - c_r}{2 + 5\delta}$
θ^{PG*}	0	0	$\frac{3\delta c_n - 2(1 + \delta)c_r + \delta(2\delta - 1)}{2 + 5\delta}$
f^*	$\frac{(1 + \delta)c_r - \delta c_n - \delta^2}{\delta + \lambda + \lambda\delta}$	0	0
p_n^{PG*}	$\frac{(1 + \delta)(\lambda c_n + c_r + \lambda) - \delta^2 + \delta}{2(\delta + \lambda + \lambda\delta)}$	$\frac{1 + c_n}{2}$	$\frac{(1 + \delta)(c_n + c_r) - \delta^2 + 3\delta + 1}{2 + 5\delta}$
p_r^{PG*}	$\frac{\delta[\lambda(c_n + \delta) + c_r]}{2(\delta + \lambda + \lambda\delta)}$	$\frac{\delta(\delta + c_n)}{1 + \delta}$	$\frac{\delta(2c_n + 2c_r + 3\delta)}{2 + 5\delta}$
π_M^{PG*}	$\frac{(1 + \delta)(\delta + \lambda - \lambda c_n - c_r)}{2(\delta + \lambda + \lambda\delta)}$	$\frac{(1 - c_n)^2}{4(1 + \delta)}$	$(1 + \delta) \left(\frac{1 + \delta - c_n - c_r}{2 + 5\delta} \right)^2$
π_R^{PG*}	0	$\frac{(1 - c_n) [\delta(c_n + \delta) - (1 + \delta)c_r]}{2(1 + \delta)^2}$	$\delta \left(\frac{1 + \delta - c_n - c_r}{2 + 5\delta} \right)^2$
τ^{PG*}	1	1	1

$$\begin{aligned}
 \text{注: } J_{II}^* &= \frac{\delta [(\lambda + 2)(d - c_n) + (2 - \delta)(2 - \lambda)] + (2\delta - \lambda\delta + 4\lambda)(v + c_r)}{2(4\delta + 4\lambda + 4\lambda^2 - \delta\lambda^2)} & J_{III}^* &= \frac{\delta [(\lambda + 2)(d - c_n) - \delta + 2] + (\delta + \lambda)(v + c_r)}{2(2\delta + 2\lambda + \lambda^2)}, \\
 K &= 2\delta c_n - (4 - \delta)c_r + (2\delta + 4\lambda - \lambda\delta)f_{II}^* + \delta(2 - \delta), \\
 c_{r1}^{PG} &= \frac{[\lambda^2(\delta - 1) + (\lambda + 1)\delta^2]v + \delta(\lambda + 2)[\lambda(\delta - 1) + \delta]d + \delta[\lambda^2(3 - \delta) + \lambda(\delta + 2) + 2\delta]c_n + \delta(\delta - 2)[2\lambda^2 + \lambda(3\delta + 1) + 3\delta]}{(\delta - 1)\lambda^2 + \delta(\lambda + 1)(3\delta - 4)}, \\
 c_{r2}^{PG} &= \frac{2\delta(2\delta + 2\lambda + \lambda^2) + \delta\lambda[2 - \delta + (\lambda + 2)(d - c_n)] + \lambda(\delta + \lambda)(v + c_r)}{2(2\delta + 2\lambda + \lambda^2)}, \\
 c_{r3}^{PG} &= \frac{\delta(\lambda + \delta)[(\lambda + 2)d - \delta + 2] + \delta[3\lambda^2 + (5\delta + 2)\lambda + 6\delta]}{\lambda^2 + 2\delta\lambda - \delta^2 + 4\delta}, \\
 c_{r4}^{PG} &= \frac{[2\delta + (4 - \delta)\lambda]^2 v + \lambda^2(4\delta - \delta^2)[2(d + c_n + 1) - \delta] + 4\lambda\delta[4d + 4(\delta - 1)c_n - \delta^2 + 4] + 4\delta^2[2d + 2c_n - 3\delta + 6]}{\lambda(4 - \delta)[\lambda(4 - \delta) + 4\delta] + 12\delta^2(2 - \delta)}, & C &= \begin{cases} \min\{c_{r4}^{PG}, \epsilon_n\} & c_{r2}^{PG} \leq c_{r3}^{PG} \\ \min\{c_{r3}^{PG}, \epsilon_n\} & c_{r2}^{PG} > c_{r3}^{PG} \end{cases}.
 \end{aligned}$$

在区间 (PG - I), 回收率 $\tau^{PG^*} = 0$, 再制造商不进行回收再制造; 在区间 (PG - II) ~ 区间 (PG - III), $\tau^{PG^*} \in (0, 1)$, 再制造商回收部分废旧产品进行再制造, 当 $\lambda = 1/\tau^{PG^*}$ 时政府的税收与补贴达到收支平衡; 在区间 (PG - IV) ~ 区间 (PG - VI), $\tau^{PG^*} = 1$, 再制造商回收所有上一周期

$$c_r \leq \frac{\lambda(2 + 5\delta)[\delta(\delta + (2 + \lambda)(c_n - d) - 2) - v(\delta + \lambda)] - \delta(4 + \delta - 6c_n)(2\lambda^2 + 4\delta\lambda + 4\delta)}{(2 - \delta)(2\lambda^2 + 4\delta\lambda + 4\delta) + \lambda(2 + 5\delta)(\delta + \lambda)}$$

时, 满足 $\theta_{III}^{PG^*} \leq \theta_{VI}^{PG^*}$.

2) 关于税收 f^* , 当 $c_r \in [\max\{c_{r1}, \epsilon_{r2}, \epsilon_{r3}\}, 1)$ 时, 满足 $f_I^* \leq f_{II}^* \leq f_{III}^* \leq f_{IV}^*$; 当再制造产业处于成熟期, $f_{IV}^* > 0, f_V^* = f_{VI}^* = 0$.

3) 关于企业利润 π^{PG^*} , 当 $c_r \geq \frac{3\delta c_n - \delta(1 - 2\delta)}{2(1 + \delta)}$ 时, 满足 $\pi_{MJ}^{PG^*} \leq \pi_{MV}^{PG^*} \leq \pi_{MI}^{PG^*}$ 和 $\pi_{rJV}^{PG^*} \leq \pi_{rNV}^{PG^*} \leq \pi_{rIV}^{PG^*}$.

在模式 PG 下, 再制造产业处于萌芽期 (成本区间 II) 时, 制造商收取专利费不利于自身与再制造商的发展 ($\theta_{II}^{PG^*} = 0$); 产业发展到一定程度 (进入成本区间 III) 时, 收取专利费才对双方有利 ($\theta_{III}^{PG^*} > 0$). 关于政府税收, 随着再制造产业不断发展, 政府定税额度不断增加 ($f_I^* \leq f_{II}^* \leq f_{III}^* \leq f_{IV}^*$), 直至进入成熟期后的成本区间 V, 政府税收与补贴的财政手段才失去作用 ($f_V^* = f_{VI}^* = 0$). 关于企业利润, 函数值比较复杂不易比较, 但在一定条件下可以得出: 产业进入成熟期后, 再制造商利润将不断增加, 而制造商的利润也将增加 (进入成本区间 V 以后), 其利润超过再制造产业未发展阶段 (成本区间 I) 的利润.

基于命题 3 可以得到推论 7.

推论 7 在模式 PG 下, 主要参数与决策变量及利润函数的相关性总结如表 6 所示.

的产品进行再制造. 比较分析命题 3 中不同成本区间下的均衡解 (由于变量及函数较多, 主要针对 θ^{PG^*} 、 f^* 及 $\pi_M^{PG^*}$ 、 $\pi_R^{PG^*}$ 展开讨论) 得到推论 6.

推论 6 1) 关于单位专利费 θ^{PG^*} , 当再制造产业处于发展期, 满足 $\theta_{II}^{PG^*} = 0, \theta_{III}^{PG^*} > 0$; 当产业处于成熟期, $\theta_{IV}^{PG^*} = \theta_{V}^{PG^*} = 0, \theta_{VI}^{PG^*} > 0$; 当

由推论 7 可得: 1) 当再制造成本位于区间 (PG - II) 和 (PG - III) 时 (即再制造产业进入萌芽和发展期), 随着新产品成本 c_n 增加, 再制品产量 $Q_r^{PG^*}$ 和价格 $p_r^{PG^*}$ 均增加, 而新产品产量 $Q_n^{PG^*}$ 下降、价格 $p_n^{PG^*}$ 增加, 总产量 Q^{PG^*} 减少, 因而回收率 τ^{PG^*} 增加; 随着再制品成本 c_r 增加, 再制品产量 $Q_r^{PG^*}$ 和价格 $p_r^{PG^*}$ 均下降, 新产品产量 $Q_n^{PG^*}$ 增加而价格 $p_n^{PG^*}$ 下降, 总产量 Q^{PG^*} 也下降, 回收率 τ^{PG^*} 减少; 关于政府税收 f^* , 随着 c_n 增加 f^* 减少, 而随着 c_r 增加 f^* 增加, 说明随着再制品成本的提高政府给予再制造商的补贴也将提升; 关于专利费 θ^{PG^*} , $\theta_{II}^{PG^*} = 0$, 随着 c_n 或 c_r 增加, $\theta_{III}^{PG^*}$ 均将减少. 2) 再制造成本位于区间 (PG - IV) ~ 区间 (PG - VI) 时 (即产业进入成熟期), 随着 c_n 或 c_r 增加, 产量 $Q_n^{PG^*}$ 、 $Q_r^{PG^*}$ 均减少, 价格 $p_n^{PG^*}$ 和 $p_r^{PG^*}$ 均上升, 企业利润 $\pi_M^{PG^*}$ 、 $\pi_R^{PG^*}$ 下降 (区间 V 除外, $\pi_{r,V}^{PG^*}$ 与 c_r 的关系不确定); 关于税收 f^* , $f_V^* = f_{VI}^* = 0, f_{IV}^*$ 随着 c_n 增加而减少、随着 c_r 增加而增加, 说明新产品成本增加政府将减税, 再制品成本增加政府将提高补贴; 关于专利费用 θ^{PG^*} , $\theta_{IV}^{PG^*} = \theta_{V}^{PG^*} = 0, \theta_{VI}^{PG^*}$ 随着 c_n 增加而增加、随着 c_r 增加而减少, 表明专利费收取是制造商转移成本的有效手段.

表6 模式PG参数与变量及利润函数的关系

Table 6 Relationship between parameters and variables, objective functions of model PG

变量	区间											
	PG - I		PG - II		PG - III		PG - IV		PG - V		PG - VI	
	参数											
	c_n	c_r	c_n	c_r	c_n	c_r	c_n	c_r	c_n	c_r	c_n	c_r
f^*	-	/	-	+	-	+	-	+	/	/	/	/
θ^{PG*}	/	/	/	/	-	-	/	/	/	/	+	-
Q_n^{PG*}	-	/	-	+	-	+	-	-	-	/	-	-
Q_r^{PG*}	/	/	+	-	+	-	-	-	-	/	-	-
Q^{PG*}	-	/	-	-	-	-	-	-	-	/	-	-
p_n^{PG*}	+	/	+	-	+	-	+	+	+	/	+	+
p_r^{PG*}	/	/	+	-	+	-	+	+	+	/	+	+
Δp^{PG*}	/	/	+	-	+	-	+	+	+	/	+	+
π_M^{PG*}	-	/	±	±	±	±	-	-	-	/	-	-
π_R^{PG*}	/	/	±	±	±	±	/	/	±	-	-	-
τ^{PG*}	/	/	+	-	+	-	/	/	/	/	/	/

注：“+”表示变量与参数正相关“-”表示变量与参数负相关“±”表示变量与参数关系不确定“/”表示变量与参数不相关。

根据命题2和命题3比较分析模式P和模式PG的主要决策变量与目标利润,得到推论8.

推论8 1) 关于总产量 Q^* 和回收率 τ^* .再制造产业进入萌芽期(成本区间II)后,满足 $Q^{PG*} > Q^*$, $\pi^{PG*} \geq \tau^{P*}$.

2) 关于专利费 θ^* .再制造产业处于未发展阶段或孵化期(区间I)时, $\theta^{PG*} = \theta^{P*} = 0$;处于萌芽和发展期时,满足 $\theta^{PG*} \geq \theta^{P*}$;进入成熟期后, $\theta^{PG*} = \theta^{P*}$.

3) 关于企业利润 π^* .制造商利润 π_M^* .

当 $c_r \in \left(0, \max\left\{0, \frac{\delta(3c_n+2\delta-1)}{2+2\delta}\right\}\right)$ 满足 $\pi_M^{PG*} = \pi_M^{P*}$;当 $c_r \in \left[\max\left\{0, \frac{\delta(3c_n+2\delta-1)}{2+2\delta}\right\}, \min\left\{\frac{\delta(c_n+\delta)}{1+\delta}, \frac{3\delta c_n - \delta(1-2\delta)}{2(1+\delta)}\right\}\right]$, 满足 $\pi_M^{PG*} \leq \pi_M^{P*}$;再制造成本区间为 $c_r \in \left[\max\left\{0, \frac{\delta(3c_n+2\delta-1)}{2+2\delta}\right\}, \frac{3\delta c_n - \delta(1-2\delta)}{2(1+\delta)}\right]$ 时, 满足 $\pi_M^{PG*} \geq \pi_M^{P*}$.

对于再制造商利润 π_R^* .当 $c_r \in \left(0, \max\left\{0, \frac{\delta(3c_n+2\delta-1)}{2+2\delta}\right\}\right)$ 满足 $\pi_R^{PG*} = \pi_R^{P*}$;当 $c_r \in \left[\max\left\{0, \frac{\delta(3c_n+2\delta-1)}{2+2\delta}\right\}, \frac{2\delta^2+3\delta c_n-\delta}{2(1+\delta)}\right]$ 时, $\pi_R^{PG*} \leq \pi_R^{P*}$.

由此可知:与模式P中企业的生产决策相比,模式PG下在特定成本区间中制造商的新产品产量无明显差异,但两类产品的总产量明显增加,回收率显著提升;进入发展期后,模式PG下制造商的单位专利费及其利润均不低于模式P中的对应值.这表明政府规制不会对新产品制造产生负面影响,并在一定程度上降低了再制造的门槛,即使再制造成本较高仍可保证再制造商有足够动力进行回收再制造.基于推论6至推论8,得到以下结论.

结论3 在有专利许可、有政府规制的情形下,制造商与再制造商的决策博弈:

1) 当再制造产业进入发展期,即再制造成本处于区间(PG-II)和区间(PG-III)时,制造商与再制造商的均衡产量与自身成本呈负相关,与对方成本呈正相关;双方均衡定价与新产品成本呈正相关,与再制品成本呈负相关;产品总产量随着双方成本下降而增加,消费者福利增加;制造商以高定价与低产量策略应对竞争者的成本优势带来的阻力,降低产品税收对企业利润的影响.

2) 再制造产业进入成熟阶段,即再制造成本处于区间(PG-IV)至区间(PG-VI)时,制造商向再制造商收取专利费用的同时还将向政府交纳

税款,此时面对两类产品生产成本的降低,制造商与再制造商都将采取低定价与高产量策略.

综合而言,在模式 PG 下,实施政府主导的生产者责任延伸制度有利于推进再制造产业发展,尤其在再制造业发展初期可有效提高产品回收再制造率,提升企业运作的环境绩效.当再制造产业处于成熟阶段时,与无政府规制模式相比,政府规制模式下的产品总产量增加,制造商与再制造商的总利润也有所提高,由此实现了企业效益、环境绩效、以及消费者福利的帕累托改进.

3 数值分析

在第 2 节中求解并分析了三种模式下制造商与再制造商的生产决策,并简单比较了各模式在

再制造产业处于相同发展阶段的均衡结果.在此基础上,还需要对三种模式下再制造业的发展情况(包括环境效益与社会福利)作进一步对比分析,更深入地了解专利许可机制与 EPR 制度对再制造产业发展的作用.本节通过绘制不同情形的企业均衡产量及利润图,直观地反映不同模式的废旧产品回收率(可反映环境效益)与企业获利(可部分反映社会福利)等情况;并比较三种模式的回收再制造成本区间,以反映不同模式再制造的环境绩效水平.

3.1 模式 N(无专利许可,无政府规制)

分别设置 $\delta=0.3$ 与 $\delta=0.7$, $c_n=0.4$ 与 $c_n=0.6$ 绘制新产品产量 Q_n^N 、再制品产量 Q_r^N 、制造商利润 π_M^N 、再制造商利润 π_R^N 与再制品成本 c_r 的关系图(图 3).

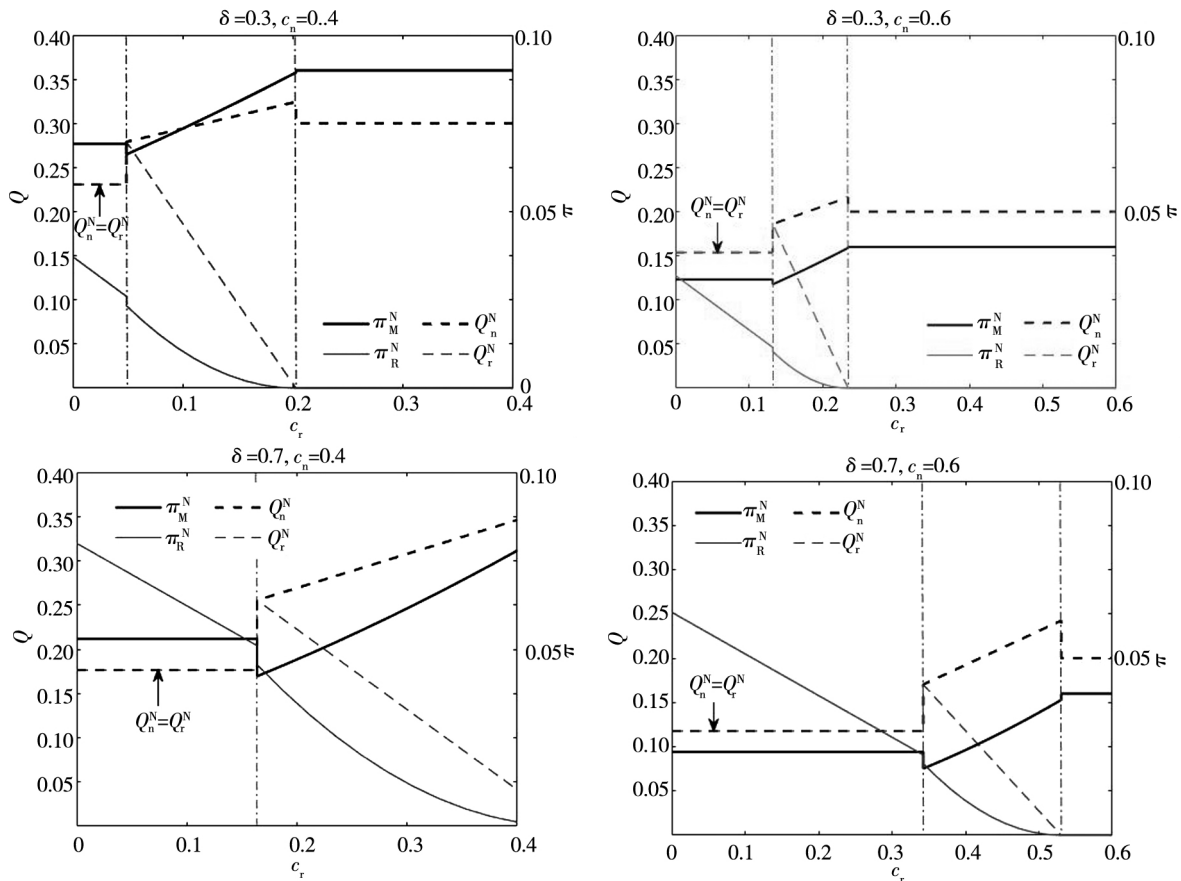


图 3 模式 N 下产量/利润与主要参数关系

Fig. 3 Relationship between outputs, profits and main parameters in the model N

当再制品产量 $Q_r^N > 0$ 时,基于图 3 可以分析得到再制品接受度、新产品成本与再制品成本对回收率和企业利润的影响. 1) 提高再制品接受度将带来回收率的提升,制造商获利减少,再制造商

获利增加.当再制品接受度较高时,回收率为 100% 的成本区间较长,回收率为 0% 的成本区间较短.再制造商获利的成本区间显著扩大,在特定成本下的再制造商获利显著提升,并且在回收率

为 100% 的成本区间上再制造商获利将高于制造商获利,因此提升再制品接受度有利于再制造商进入该产品市场并增加利润. 2) 提高新产品成本将带来回收率的提升、企业利润的减少. 当新产品成本较高时,回收率提高但新产品产量明显减少,两类产品总产量也降低,因此导致制造商与再制造商利润下降. 3) 再制造成本小于一定阈值时,回收率维持在 100%. 再制造成本的提高使再制造商获利降低,对制造商获利无影响. 再制造成本高于一定阈值时,回收率下降,制造商利润增加,再制造商利润减少.

3.2 模式 P(有专利许可,无政府规制)

分别设置 $\delta=0.3$ 与 $\delta=0.7$, $c_n=0.4$ 与 $c_n=0.6$. 绘制产量 Q_n^P 和 Q_r^P 、企业利润 π_M^P 和 π_R^P 、单位专利费 θ^P 与再制品成本 c_r 的关系图(如图 4).

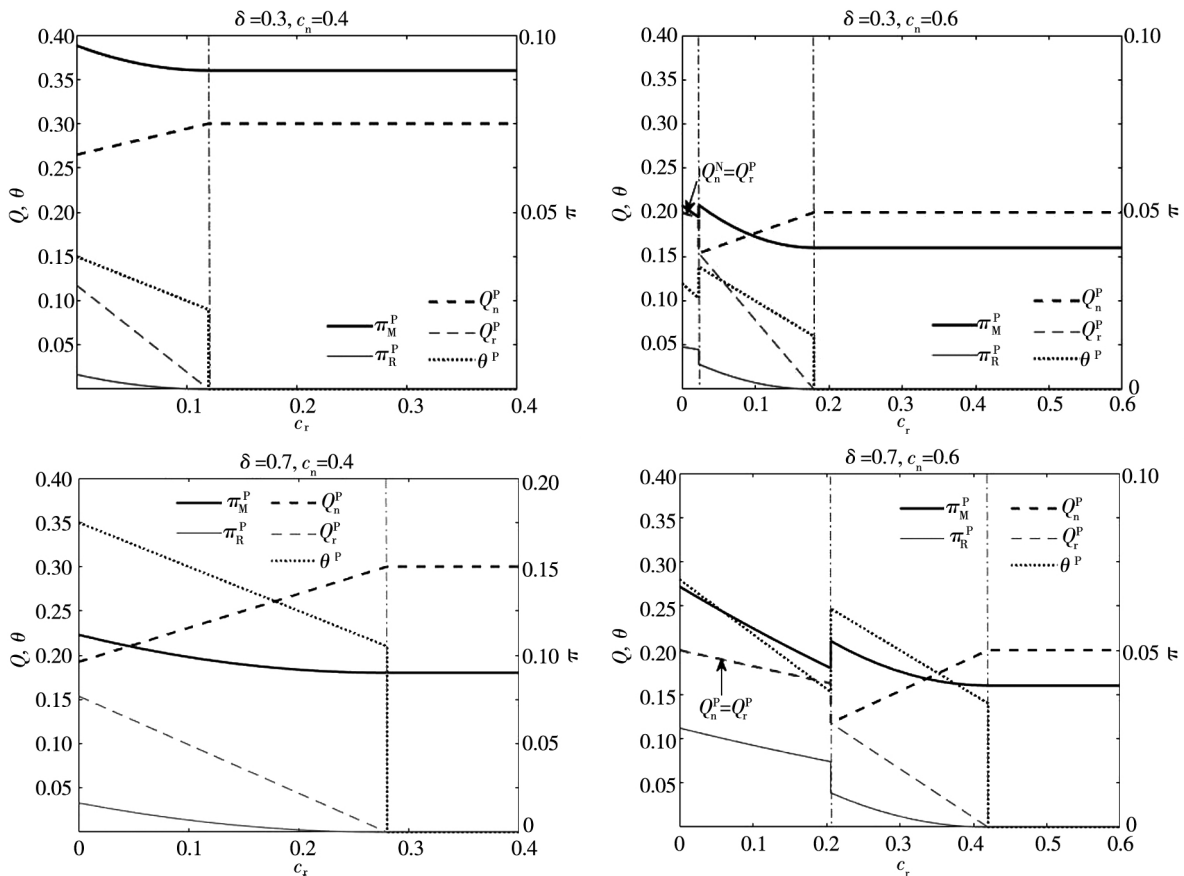


图 4 模式 P 下产量/专利费/利润与主要参数关系

Fig. 4 Relationship between outputs, patent fee, profits and main parameters in the model P

3.3 模式 PG(有专利许可,有政府规制)

分别设置 $\delta=0.3$ 与 $\delta=0.7$, $c_n=0.4$ 与 $c_n=0.6$, $\nu=0.2$ 与 $\nu=0.5$, $\rho=0.1$, $\lambda=1$. 绘制产量 Q_n^{PG} 和 Q_r^{PG} 、企业利润 π_M^{PG} 和 π_R^{PG} 、专利费用 θ^{PG} 、税收额

对比模式 N 与模式 P 的两类产品产量以及双方利润情况,可以得到专利许可机制对企业决策与收益的影响作用如下. 1) 专利机制的存在导致回收率下降. 对比图 3 与图 4 可见,100% 回收率的成本范围减小,零回收率的成本范围扩大. 2) 当再制造产业处于萌芽与发展阶段,专利机制的存在使制造商与再制造商获利减少. 随着再制品成本增加,再制造商减小生产规模,制造商降低单位产品专利费,双方利润均下降;专利机制的存在对处于发展期的再制造产业具有一定的抑制作用. 3) 当再制造产业发展至成熟阶段,专利机制的存在使制造商获利增加,再制造商获利减少. 在再制造成本较低时,与模式 N 比较,模式 P 下的再制造商利润下降,制造商利润增加,但制造商可通过专利费用弥补一部分成本损失.

f 与再制品成本 c_r 的关系图(如图 5).

对比模式 P 与模式 PG 的两类产品产量以及企业收益可以发现,税收补贴机制对企业再制造决策将产生一定的积极作用. 1) 再制造成本越高,

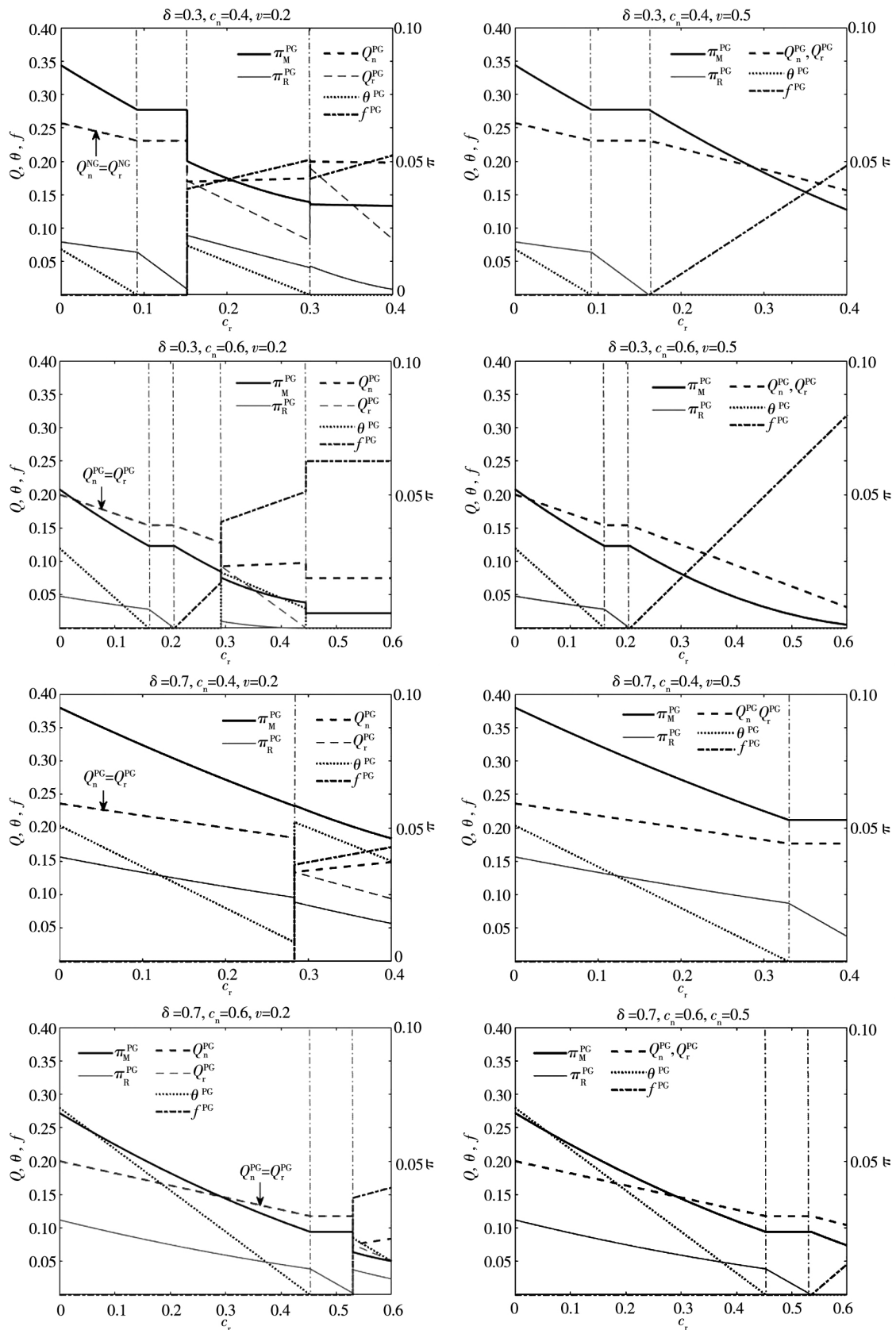


图 5 模式 PG 下产量/专利费/税收/利润与主要参数关系

Fig. 5 Relationship between outputs , patent fee , tax , profits and main parameters in the model PG

再制品接受度越低,则政府的税收补贴力度需越强;针对再制造成本较低且再制品接受度较高的产品,政府可采取少补贴或不补贴的策略. 2) 税收补贴机制将促进回收率的提高. 比较图4与图5可见,100%回收率的成本范围扩大,零回收率的成本范围减小,并且在再制品接受度较高或新产品成本较高情况下,产品回收率在再制品生产成本较高时仍可维持在100%,此时再制造商极易进入该产品市场. 3) 税收补贴机制增加了再制造商利润. 在特定成本下模式PG的再制造商利润高于模式P的,两种模式中制造商的新产品产量与获利无显著差异. 4) 单位产品环境效益的提高将提升回收率. 通过图5中不同环境效益值的比较可见,再制造带来的环境效益对新产品产量无影响,对再制品产量有明显的促进作用,环境效益的增加使100%回收率的成本范围扩大.

综上四点,在专利许可机制下政府可以在再制造产业萌芽和发展阶段采用税收补贴机制,该模式在保证制造商维持一定新产品生产规模的同时,可以有效提高再制造商的回收再制造率,激发其生产积极性;且再制造带来的环境效益越高,对再制造产业发展的促进作用越显著.

3.4 三种模式下的再制造成本边界

由于产品的回收再制造状况在一定程度上可以反映再制造的环境绩效水平,因此本节比较三

种模式的回收再制造成本区间. 为便于分析,首先根据第2节中各模式的均衡结果得到3组再制造成本边界值,如表7所示,其中 \underline{c}_r^j 表示再制造商回收再制造全部废旧产品的成本上边界值(上界值,即 $c_r \leq \underline{c}_r^j$ 时,再制造商将100%回收再制造), \overline{c}_r^j 表示再制造商进入再制品市场的成本下边界值(下界值,即 $c_r \leq \overline{c}_r^j$ 时,再制造商开始实施回收再制造),显然 $\underline{c}_r^j \leq \overline{c}_r^j$.

表7 三种模式下的再制造成本边界值

Table 7 Critical values of the remanufacturing cost under three models

再制造模式	\underline{c}_r^j (上界值)	\overline{c}_r^j (下界值)
N	$\max\left\{0, \frac{\delta(6c_n + \delta - 2)}{4 + \delta}\right\}$	$\frac{\delta(2c_n - \delta + 2)}{4 - \delta}$
P	$\max\left\{0, \frac{\delta(3c_n + 2\delta - 1)}{2(1 + \delta)}\right\}$	$\frac{\delta(2c_n - \delta + 2)}{4 - \delta}$
PG	c_{n1} (见表5)	C (见表5)

设 $\delta = 0.3$ 与 $\delta = 0.7$, $c_n = 0.4$ 与 $c_n = 0.6$, $v = 0.2$ 与 $v = 0.5$, $d = 0.1$, $\lambda = 1$ 为基准参数值,以再制造成本 c_r 为横轴,在其上的平行坐标中标注不同参数设置下的再制造成本边界值(根据表7得到),得图6. 为区分上、下边界值,图6中分别采用倒三角与正三角标记 \underline{c}_r^j 与 \overline{c}_r^j .

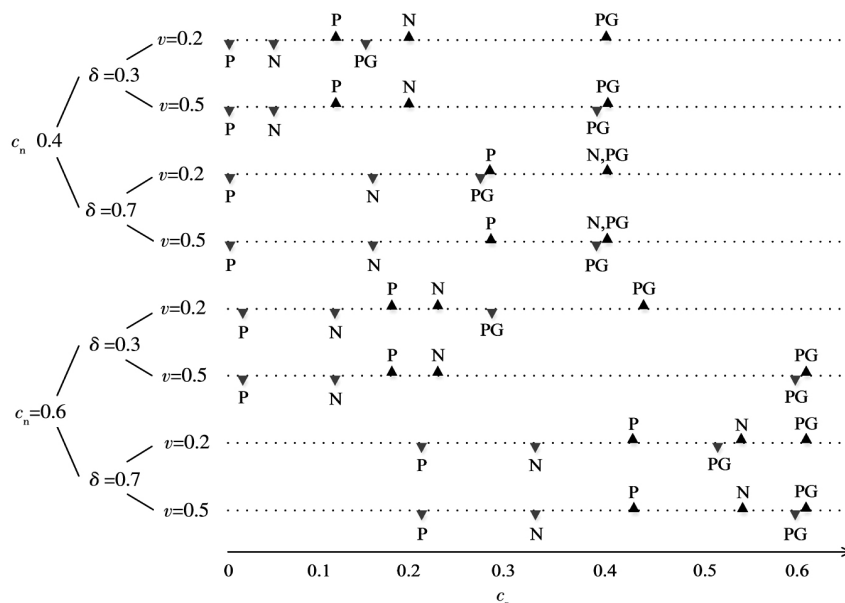


图6 不同参数值对应的再制造成本区间

Fig. 6 Remanufacturing cost interval under different parameters

分析图6中不同模式的 \underline{c}_r^j 与 \overline{c}_r^j 的关系发现:

\underline{c}_r^j 满足 $\underline{c}_r^P < \underline{c}_r^N < \underline{c}_r^{PG}$, 而 \overline{c}_r^j 也满足 $\underline{c}_r^P < \underline{c}_r^N < \underline{c}_r^{PG}$
(取多组数值, 该结论始终成立).

由此可以得到: 1) 模式P的回收再制造率受再制造成本的约束最大, 要求再制造商进入该产品市场以及选择回收所有产品的边界成本都较低, 然后依次是模式N、模式PG; 因此专利许可机制在一定程度上限制了废旧品回收与再制品生产的规模, 压缩了再制造商的获利空间, 阻碍了再制造产业的发展进程. 2) 模式PG下的再制造商进入再制品市场与100%回收再制造的边界成本较高, 该模式下进入再制品市场的门槛较低; 因此在采用专利许可机制的前提下, 政府规制的存在能有效提高废旧产品回收率, 提升再制造商竞争力, 对再制造产业发展具有显著的推动作用. 3) 当 $c_n = 0.6$ ($\delta = 0.7$ 或 $v = 0.5$) 时, 各模式下的再制造进入与100%回收的边界成本都高于 $c_n = 0.4$ ($\delta = 0.3$ 或 $v = 0.2$) 时的边界成本, 因此当再制品的单位成本一定时, 新产品的单位成本越高(消费者对再制品的接受程度越高、或单位产品再制造带来的环境效益溢出越大), 废旧产品的回收率就越高, 再制品的竞争优势也越明显.

4 结束语

本文构建了专利许可机制及政府规制下的制造商与再制造商动态博弈模型, 通过对比分析无专利许可无政府规制、有专利许可无政府规制、有专利许可有政府规制三种模式下制造商与再制造商的产量、定价以及收益情况, 得到在再制造产业不同发展阶段中专利许可费与政府EPR规制对再制造绩效(包括企业收益、环境绩效、消费者福利)的影响. 研究发现, 专利许可费的存在对再制造活动具有一定的抑制作用, 仅在再制造产业较

为成熟时才能为制造商带来显著收益, 而政府通过税收补贴机制在再制造发展的各个阶段都能有效地促进再制造产业的发展.

1) 当再制造技术水平较低, 且消费者对再制品接受度较低时, 再制造商不进入该产品市场, 此时专利机制的存在将进一步提高再制造成本费用, 阻碍再制造产业的发展; 政府的税收补贴机制, 可监督制造商执行生产者延伸责任, 有效降低再制造的准入门槛, 为再制造产业提供一定的发展空间.

2) 当再制造产业进入发展期, 与无专利许可模式相比, 专利许可模式下的新产品产量无明显差异, 再制造商利润与再制品产量显著下降, 消费者福利降低; 与无政府规制模式相比, 政府规制模式下的新产品产量与制造商利润无明显差异, 再制品产量与再制造商利润显著提升, 在再制造产业发展不完善时政府采用较强的税收补贴力度, 可有效地提升废旧产品的回收再制造率, 同时提升消费者福利.

3) 在再制造发展较为成熟阶段, 与无专利许可模式相比, 专利许可模式下的新产品产量无明显差异, 制造商可从专利费收取中获利, 再制造商利润与产品回收率显著下降; 与无政府规制模式相比, 政府规制模式下的新产品产量与制造商利润无明显差异, 再制品产量与再制造商利润增加, 当再制造市场较为完善时政府可采取少补贴或不补贴的策略, 确保高回收率同时减少财政支出.

本文没有构建无专利保护下基于EPR制度的再制造博弈模型, 且在模式PG中未将政府收支平衡列为约束条件, 下一步的研究工作将考虑政府在收支平衡情况下的EPR规制措施, 并探讨政府规制对再制造各阶段企业绩效的影响. 此外, 本文仅研究了特许权费率定价情况, 关于考虑二部制专利许可定价的再制造供应链系统协调决策问题, 也是需要进一步研究的内容.

参考文献:

- [1]Agrawal V , Atasu A , Ittersum K. Remanufacturing , third-party competition , and consumers' perceived value of new products [J]. *Management Science* , 2015 , 61(1) : 60 – 72.
- [2]郑本荣 , 杨超 , 杨珺 , 等. 产品再制造、渠道竞争和制造商渠道入侵 [J]. *管理科学学报* , 2018 , 21(8) : 98 – 111.
Zheng Benrong , Yang Chao , Yang Jun , et al. Product remanufacturing , channle competition and manufacturer encroachment [J]. *Journal of Management Sciences in China* , 2018 , 21(8) : 98 – 111. (in Chinese)
- [3]熊中楷 , 申成然 , 彭志强. 专利保护下再制造闭环供应链协调机制研究 [J]. *管理科学学报* , 2011 , 14(6) : 76 – 85.
Xiong Zhongkai , Shen Chengran , Peng Zhiqiang. Closed-loop supply chain coordination research with remanufacturing under patent protection [J]. *Journal of Management Sciences in China* , 2011 , 14(6) : 76 – 85. (in Chinese)
- [4]申成然 , 刘名武 , 熊中楷. 考虑专利许可的制造商与再制造商竞争策略 [J]. *运筹与管理* , 2014 , (2) : 55 – 63.
Shen Chengran , Liu Mingwu , Xiong Zhongkai. Competitive strategy for the manufacturer and remanufacturer under patent licensing [J]. *Operations Research and Management Science* , 2014 , (2) : 55 – 63. (in Chinese)
- [5]许民利 , 莫珍连 , 简惠云 , 等. 考虑低碳消费者行为和专利保护的再制造产品定价决策 [J]. *控制与决策* , 2016 , 31(7) : 1237 – 1246.
Xu Minli , Mo Zhenlian , Jian Huiyun , et al. Pricing decision of remanufactured product considering behavior of low-carbon consumers and patent protection [J]. *Control and Decision* , 2016 , 31(7) : 1237 – 1246. (in Chinese)
- [6]Zhang C T , Ren M L. Closed-loop supply chain coordination strategy for the remanufacture of patented products under competitive demand [J]. *Applied Mathematical Modelling* , 2016 , 40(13/14) : 6243 – 6255.
- [7]易中胤 , 阳小栋. 不同专利许可模式下的再制造闭环供应链模型 [J]. *计算机集成制造系统* , 2014 , 20(9) : 2305 – 2312.
Yi Yuyin , Yang Xiaodong. Remanufacturing closed-loop supply chain under different patent licensing mode [J]. *Computer Integrated Manufacturing System* , 2014 , 20(9) : 2305 – 2312. (in Chinese)
- [8]Hong X , Govindan K , Xu L , et al. Quantity and collection decisions in a closed-loop supply chain with technology licensing [J]. *European Journal of Operational Research* , 2017 , 256(3) : 820 – 829.
- [9]Chen J , Liang L , Yao D Q. An analysis of intellectual property licensing strategy under duopoly competition: Component or product-based? [J]. *International Journal of Production Economics* , 2017 , 193: 502 – 513.
- [10]熊中楷 , 申成然 , 彭志强. 专利保护下闭环供应链的再制造策略研究 [J]. *管理工程学报* , 2012 , 26(3) : 159 – 165.
Xiong Zhongkai , Shen Chengran , Peng Zhiqiang. A remanufacturing strategy for the closed-loop supply chain under patent protection [J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management* , 2012 , 26(3) : 159 – 165. (in Chinese)
- [11]申成然 , 熊中楷 , 孟卫军. 考虑专利保护的闭环供应链再制造模式 [J]. *系统管理学报* , 2015 , 24(1) : 123 – 129.
Shen Chengran , Xiong Zhongkai , Meng Weijun. Remanufacturing modes of the closed-loop supply chain under patent protection [J]. *Journal of Systems & Management* , 2015 , 24(1) : 123 – 129. (in Chinese)
- [12]Huang Y , Wang Z. Information sharing in a closed-loop supply chain with technology licensing [J]. *International Journal of Production Economics* , 2017 , 191: 113 – 127.
- [13]Wu X , Zhou Y. Buyer-specific versus uniform pricing in a closed-loop supply chain with third-party remanufacturing [J]. *European Journal of Operational Research* , 2019 , 273(2) : 548 – 560.

- [14] Ma W M , Zhao Z , Ke H. Dual-channel closed-loop supply chain with government consumption-subsidy [J]. *European Journal of Operational Research* , 2013 , 226(2) : 221 – 227.
- [15] 张曙红 , 初叶萍. 考虑政府约束的再制造闭环供应链差别定价博弈模型 [J]. *运筹与管理* , 2014 , (3) : 119 – 126.
Zhang Shuhong , Chu Yeping. Research on the discriminatory pricing game model of closed-loop supply chain based on re-manufacturing with government restrictions [J]. *Operations Research and Management Science* , 2014 , (3) : 119 – 126. (in Chinese)
- [16] Wang W , Zhang Y , Zhang K , et al. Reward-penalty mechanism for closed-loop supply chains under responsibility-sharing and different power structures [J]. *International Journal of Production Economics* , 2015 , 170: 178 – 190.
- [17] 张汉江 , 余华英 , 李聪颖. 闭环供应链上的回收激励契约设计与政府补贴再制造政策的优化 [J]. *中国管理科学* , 2016 , 24(8) : 71 – 78.
Zhang Hanjiang , Yu Huaying , Li Congying. Incentive contract design and optimization of government subsidies policy in the closed-loop supply chain [J]. *Chinese Journal of Management Science* , 2016 , 24(8) : 71 – 78. (in Chinese)
- [18] 赵敬华 , 林 杰. 不同补贴对象下的闭环供应链定价模型 [J]. *管理工程学报* , 2017 , 31(1) : 85 – 92.
Zhao Jinghua , Lin Jie. Pricing model of closed-loop supply chain under different subsidy policies [J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management* , 2017 , 31(1) : 85 – 92. (in Chinese)
- [19] 夏西强 , 朱庆华 , 赵森林. 政府补贴下制造/再制造竞争机理研究 [J]. *管理科学学报* , 2017 , 20(4) : 71 – 83.
Xia Xiqiang , Zhu Qinghua , Zhao Senlin. Competition mechanism of manufacturer/remanufacturer considering government subsidies [J]. *Journal of Management Sciences in China* , 2017 , 20(4) : 71 – 83. (in Chinese)
- [20] Heydari J , Govindan K , Jafari A. Reverse and closed loop supply chain coordination by considering government role [J]. *Transportation Research Part D Transport & Environment* , 2017 , 52(A) : 379 – 398.
- [21] Murali K , Lim M K , Petruzzi N C. The effects of ecolabels and environmental regulation on green product development [EB/OL]. *Manufacturing & Service Operations Management* , Available Online 2018. 7. 27 , <https://doi.org/10.1287/msom.2017.0703>.
- [22] Zhang F , Zhang R. Trade-in remanufacturing , customer purchasing behavior , and government policy [J]. *Manufacturing & Service Operations Management* , 2018 , 20(4) : 601 – 616.
- [23] Pazoki M , Zaccou G. A mechanism to promote product recovery and environmental performance [J]. *European Journal of Operational Research* , 2019 , 274(2) : 601 – 614.
- [24] 申成然 , 熊中楷 , 彭志强. 专利保护与政府补贴下再制造闭环供应链的决策和协调 [J]. *管理工程学报* , 2013 , 27(3) : 132 – 138.
Shen Chengran , Xiong Zhongkai , Peng Zhiqiang. Decision and coordination research for remanufacturing closed-loop supply chain under patent protection and government subsidies [J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management* , 2013 , 27(3) : 132 – 138. (in Chinese)
- [25] 朱庆华 , 夏西强 , 李幻云. 政府补贴与专利费用下制造与再制造博弈模型 [J]. *系统工程学报* , 2017 , 32(1) : 8 – 18.
Zhu Qinghua , Xia Xiqiang , Li Huanyun. A game model between a manufacturer and remanufacturer based on government subsidies and patent fees [J]. *Journal of Systems Engineering* , 2017 , 32(1) : 8 – 18. (in Chinese)
- [26] Kalimo H. E-Cycling: Linking Trade and Environmental Law in the EC and the US [M]. Ardsley: Transnational Publishers , 2006.
- [27] Stern N. *The Economics of Climate Change* [M]. Cambridge: Cambridge Press , 2008.
- [28] Ferrer G , Swaminathan J M. Managing new and remanufactured products [J]. *Management Science* , 2006 , 52(1) : 15 – 26.

Remanufacturing game with patent protection and government regulation

CAO Jian , ZHAO Yun-wen , WU Si-si , ZHANG Xue-mei , ZHOU Gen-gui

School of Management , Zhejiang University of Technology , Hangzhou 310023 , China

Abstract: Patent protection and government regulation are studied in the process of end-of-life (EOL) product collection and remanufacturing operations undertaken by the third-party remanufacturer. Dynamic game models between manufacturers and remanufacturers are established for three scenarios to discuss respective production decision-makings of enterprises and remanufacturing performances: no patent protection without government regulation, patent protection without government regulation, and patent protection with government regulation. The results indicate that the manufacturer-led patent licensing mechanism restrains remanufacturing to some extent and can bring significant benefits to the manufacturers only when the remanufacturing industry is relatively well developed. The government-led extended producer responsibility (EPR) mechanism can facilitate the development of remanufacturing industry, by effectively enhancing the product recovery rate, especially during the early development periods of remanufacturing. In addition, the promoting effect of the government-led mechanism on remanufacturing implementations is positively related to the environmental benefits brought about by remanufacturing. The conclusions are of significant references for remanufacturing-related enterprises in developing production strategies concerning remanufacturing patented products and for the government in developing related fiscal policies.

Key words: remanufacturing; extended producer responsibility (EPR); patent licensing; dynamic game

附录 A

需求函数求解

假设消费者对产品的支付意愿为 β , β 服从 $[0, 1]$ 的均匀分布, 其密度函数 $f(\beta) = 1$. 消费者购买新产品与再制品的效用函数分别为 $u_n = \beta - p_n$, $u_r = \delta\beta - p_r$.

- 1) 当购买新产品的效用大于购买再制品的效用时, 消费者倾向于购买新产品. 由 $u_n > u_r$ 可得 $\beta > \frac{p_n - p_r}{1 - \delta}$. 即 $\beta \in \left(\frac{p_n - p_r}{1 - \delta}, 1\right]$ 时, 消费者购买新产品. 由于需求函数的连续可微性, 得到新产品的需求为 $Q_n = \int_{\frac{p_n - p_r}{1 - \delta}}^1 f(\beta) d\beta = 1 - \frac{p_n - p_r}{1 - \delta}$.
- 2) 当购买再制品的效用大于购买新产品的效用且购买再制品的效用大于 0 时, 消费者倾向于购买再制品. 由 $u_r > u_n$ 和 $u_r > 0$ 可得 $\frac{p_r}{\delta} < \beta < \frac{p_n - p_r}{1 - \delta}$. 即 $\beta \in \left(\frac{p_r}{\delta}, \frac{p_n - p_r}{1 - \delta}\right)$ 时, 消费者购买再制品. 同理可得再制品的需求为 $Q_r = \int_{\frac{p_r}{\delta}}^{\frac{p_n - p_r}{1 - \delta}} f(\beta) d\beta = \frac{\delta p_n - p_r}{\delta(1 - \delta)}$.
- 3) 由上述 Q_n 和 Q_r 得到产品总需求及两类产品的价格分别为 $Q = Q_n + Q_r = 1 - \frac{p_r}{\delta}$, $p_n = 1 - Q_n - \delta Q_r$, $p_r = \delta(1 - Q_n - Q_r)$.

附录 B

模式 N 结论证明

在模式 N 中,再制造商和制造商的利润函数以及两者产量决策需满足的条件分别为 $\pi_R^N = -\delta(Q_r^N)^2 + (\delta - \delta Q_n^N - c_r)Q_r^N$, $\pi_M^N = -(Q_n^N)^2 + (1 - \delta Q_r^N - c_n)Q_n^N$ 和 $0 \leq Q_r^N \leq Q_n^N$. 由此得到 Q_r^N 关于 Q_n^N 的最优解表达式 $Q_r^N(Q_n^N)$: 1) 当 $Q_n^N \in [0, \frac{\delta - c_r}{3\delta}]$ 时, $Q_r^N(Q_n^N) = Q_n^N$; 2) 当 $Q_n^N \in (\frac{\delta - c_r}{3\delta}, \frac{\delta - c_r}{\delta}]$ 时, $Q_r^N(Q_n^N) = \frac{-\delta Q_n^N + \delta - c_r}{2\delta}$; 3) 当 $Q_n^N \in (\frac{\delta - c_r}{\delta}, 1)$ 时, $Q_r^N(Q_n^N) = 0$.

分别将 3 种情形下的 $Q_r^N(Q_n^N)$ 代入 π_M^N 的表达式中,求解各成本区间下的 Q_n^{N*} : 1) 当 $Q_n^N \in [0, \frac{\delta - c_r}{3\delta}]$ 时, $\pi_M^N = -(1 + \delta)(Q_n^N)^2 + (1 - c_n)Q_n^N$, 由最优化一阶条件 $\frac{\partial \pi_M^N}{\partial Q_n^N} = 0$ 可以得到 $Q_n^{N*} = \frac{1 - c_n}{2(1 + \delta)}$; 2) 当 $Q_n^N \in (\frac{\delta - c_r}{3\delta}, \frac{\delta - c_r}{\delta}]$ 时, $\pi_M^N = -(1 - \frac{\delta}{2})(Q_n^N)^2 + \frac{2 - \delta + c_r - 2c_n}{2}Q_n^N$, 同理,由 $\frac{\partial \pi_M^N}{\partial Q_n^N} = 0$ 得 $Q_n^{N*} = \frac{2 - \delta + c_r - 2c_n}{4 - 2\delta}$; 3) 当 $Q_n^N \in (\frac{\delta - c_r}{\delta}, 1)$ 时, $\pi_M^N = -(Q_n^N)^2 + (1 - c_n)Q_n^N$, 由 $\frac{\partial \pi_M^N}{\partial Q_n^N} = 0$ 得 $Q_n^{N*} = \frac{1 - c_n}{2}$.

依次将上述 Q_n^{N*} 的表达式代入 $Q_r^N(Q_n^N)$ 中,得到相应成本区间下的 Q_n^{N*} 和 Q_r^{N*} : 1) 当 $c_r \in (0, \max\{0, \frac{\delta(6c_n + \delta - 2)}{4 + \delta}\}]$ 时, $Q_n^{N*} = \frac{1 - c_n}{2(1 + \delta)}$, $Q_r^{N*} = \frac{1 - c_n}{2(1 + \delta)}$; 2) 当 $c_r \in (\max\{0, \frac{\delta(6c_n + \delta - 2)}{4 + \delta}\}, \min\{\frac{\delta(2c_n + 2 - \delta)}{4 - \delta}, c_n\}]$ 时, $Q_n^{N*} = \frac{2 - \delta + c_r - 2c_n}{2(2 - \delta)}$, $Q_r^{N*} = \frac{2\delta c_n - (4 - \delta)c_r + \delta(2 - \delta)}{4\delta(2 - \delta)}$; 3) 当 $c_r \in (\min\{\frac{\delta(2c_n + 2 - \delta)}{4 - \delta}, c_n\}, c_n)$ 时, $Q_n^{N*} = \frac{1 - c_n}{2}$, $Q_r^{N*} = 0$. 进一步可求得不同成本区间下的新产品和再制品的价格、以及制造商和再制造商的收益等如表 1 所示.

附录 C

模式 P 结论证明

在模式 P 中,企业利润函数及产量决策需满足的条件分别为 $\pi_R^P = -\delta(Q_r^P)^2 + (\delta - \delta Q_n^P - c_r - \theta^P)Q_r^P$, $\pi_M^P = -(Q_n^P)^2 + (1 - \delta Q_r^P - c_n)Q_n^P + \theta^P Q_r^P$ 和 $0 \leq Q_r^P \leq Q_n^P$. 由此得到 Q_r^P 关于 Q_n^P 的最优解表达式 $Q_r^P(Q_n^P)$: 1) 当 $Q_n^P \in (0, \frac{\delta - c_r - \theta^P}{3\delta}]$ 时, $Q_r^P(Q_n^P) = Q_n^P$; 2) 当 $Q_n^P \in (\frac{\delta - c_r - \theta^P}{3\delta}, \frac{\delta - c_r - \theta^P}{\delta}]$ 时, $Q_r^P(Q_n^P) = \frac{-\delta Q_n^P + \delta - c_r - \theta^P}{2\delta}$; 3) 当 $Q_n^P \in (\frac{\delta - c_r - \theta^P}{\delta}, 1)$ 时, $Q_r^P(Q_n^P) = 0$.

分别将 3 种情形下的 $Q_r^P(Q_n^P)$ 代入 π_M^P 的表达式中,求解各成本区间下的 Q_n^{P*} 、 θ^{P*} 得到: 1) 当 $Q_n^P \in (0, \frac{\delta - c_r - \theta^P}{3\delta}]$ 时, $\pi_M^P = -(1 + \delta)(Q_n^P)^2 + (1 - c_n + \theta^P)Q_n^P$, 由最优化一阶条件 $\frac{\partial \pi_M^P}{\partial Q_n^P} = 0$ 得 $Q_n^{P*}(\theta^P) = \frac{1 - c_n + \theta^P}{2(1 + \delta)}$, 此时 θ^P 需满足条件 $\theta^P \leq \frac{3\delta c_n - 2(1 + \delta)c_r + \delta(2\delta - 1)}{2 + 5\delta}$. 将 $Q_n^{P*}(\theta^P)$ 代入 π_M^P 的表达式得 $\pi_M^P = \frac{(1 - c_n + \theta^P)^2}{4(1 + \delta)}$. 因为 π_M^P 随 θ^P 增大而增大,可得 $\theta^{P*} = \frac{3\delta c_n - 2(1 + \delta)c_r + \delta(2\delta - 1)}{2 + 5\delta}$. 2) 当 $Q_n^P \in (\frac{\delta - c_r - \theta^P}{3\delta}, \frac{\delta - c_r - \theta^P}{\delta}]$ 时, $\pi_M^P = -(1 - \frac{\delta}{2})(Q_n^P)^2 + \frac{2 - \delta + c_r - 2c_n}{2}Q_n^P + \frac{\theta^P(-\theta^P + \delta - c_r)}{2\delta}$, 同理,由 $\frac{\partial \pi_M^P}{\partial Q_n^P} = 0$ 和 $\frac{\partial \pi_M^P}{\partial \theta^P} = 0$ 得 $Q_n^{P*} = \frac{2 - \delta + c_r - 2c_n}{4 - 2\delta}$, $\theta^{P*} =$

$\frac{\delta - c_r}{2}$. 3) 当 $Q_n^p \in \left(\frac{\delta - c_r - \theta^p}{\delta}, 1\right)$ 时, $\pi_M^p = -(Q_n^p)^2 + (1 - c_n)Q_n^p$, 由 $\frac{\partial \pi_M^p}{\partial Q_n^p} = 0$ 得 $Q_n^{p*} = \frac{1 - c_n}{2}$.

将上述 Q_n^{p*} 、 θ^{p*} 代入 $Q_r^p(Q_n^p)$, 可得相应成本区间下 θ^{p*} 、 Q_n^{p*} 、 Q_r^{p*} 的表达式: 1) 当 $c_r \in \left(0, \max\left\{0, \frac{\delta(3c_n + 2\delta - 1)}{2(1 + \delta)}\right\}\right]$ 时, $\theta^{p*} = \frac{3\delta c_n - 2(1 + \delta)c_r + \delta(2\delta - 1)}{2 + 5\delta}$, $Q_n^{p*} = \frac{1 - c_n}{2(1 + \delta)}$, $Q_r^{p*} = \frac{1 - c_n}{2(1 + \delta)}$; 2) 当 $c_r \in \left(\max\left\{0, \frac{\delta(3c_n + 2\delta - 1)}{2(1 + \delta)}\right\}, \delta c_n\right]$ 时, $\theta^{p*} = \frac{\delta - c_r}{2}$, $Q_n^{p*} = \frac{2 - \delta + c_r - 2c_n}{2(2 - \delta)}$, $Q_r^{p*} = \frac{2\delta c_n - (4 - \delta)c_r + \delta(2 - \delta)}{4\delta(2 - \delta)}$; 3) 当 $c_r \in (\delta c_n, 1)$ 时, $Q_n^{p*} = \frac{1 - c_n}{2}$, $Q_r^{p*} = 0$. 由此可进一步求得不同成本区间下的产品价格以及企业利润等如表 3 所示.

附录 D

模式 PG 结论证明

在模式 PG 中, 企业利润函数、产量决策需满足的条件、以及政府的目标函数分别为 $\pi_R^{PG} = -\delta(Q_r^{PG})^2 + (\delta - \delta Q_n^{PG} - c_r - \theta^{PG} + \lambda f)Q_r^{PG}$, $\pi_M^{PG} = -(Q_n^{PG})^2 + (1 - \delta Q_r^{PG} - c_n - f)Q_n^{PG} + \theta^{PG}Q_r^{PG}$, $0 \leq Q_r^{PG} \leq Q_n^{PG}$, $\pi_G^{PG} = vQ_r^{PG} - dQ_n^{PG} - \lambda fQ_r^{PG} + fQ_n^{PG}$. 由上述条件得到 Q_r^{PG} 关于 Q_n^{PG} 的最优解表达式 $Q_r^{PG*}(Q_n^{PG})$: 1) 当 $Q_n^{PG} \in \left(0, \frac{\delta - c_r - \theta^{PG}}{3\delta}\right]$ 时, $Q_r^{PG*}(Q_n^{PG}) = Q_n^{PG}$; 2) 当 $Q_n^{PG} \in \left(\frac{\delta - c_r - \theta^{PG} + \lambda f}{3\delta}, \frac{\delta - c_r - \theta^{PG} + \lambda f}{\delta}\right]$ 时, $Q_r^{PG*}(Q_n^{PG}) = \frac{-\delta Q_n^{PG} + \delta - c_r - \theta^{PG} + \lambda f}{2\delta}$; 3) 当 $Q_n^{PG} \in \left(\frac{\delta - c_r - \theta^{PG} + \lambda f}{\delta}, 1\right)$ 时, $Q_r^{PG*}(Q_n^{PG}) = 0$.

分别将 3 种情形下的 $Q_r^{PG*}(Q_n^{PG})$ 代入 π_M^{PG} 表达式, 求解各个成本区间下的 $Q_n^{PG*}(f)$ 、 $\theta^{PG*}(f)$.

1) 当 $Q_n^{PG} \in \left(0, \frac{\delta - c_r - \theta^{PG}}{3\delta}\right]$ 时, $\pi_M^{PG} = -(1 + \delta)(Q_n^{PG})^2 + (1 - c_n + \theta^{PG} - f)Q_n^{PG}$, 由 $\frac{\partial \pi_M^{PG}}{\partial Q_n^{PG}} = 0$ 可得 $Q_n^{PG*}(\theta^{PG}, f) = \frac{1 - c_n + \theta^{PG} - f}{2(1 + \delta)}$. 根据 $Q_n^{PG} \in \left(0, \frac{\delta - c_r - \theta^{PG}}{3\delta}\right]$, 可得 $\theta^{PG} \leq \frac{3\delta c_n - 2(1 + \delta)c_r + \delta(2\delta - 1) + [2\lambda(1 + \delta) + 3\delta]f}{2 + 5\delta}$.

将 $Q_n^{PG*}(\theta^{PG}, f)$ 代入 π_M^{PG} 得 $\pi_M^{PG} = \frac{(1 - c_n + \theta^{PG} - f)^2}{4(1 + \delta)}$. π_M^{PG} 随 θ^{PG} 增大而增大, 得到 $\theta^{PG*}(f) = \frac{3\delta c_n - 2(1 + \delta)c_r + \delta(2\delta - 1) + [2\lambda(1 + \delta) + 3\delta]f}{2 + 5\delta}$. $\pi_G^{PG} = \frac{(v - d - \lambda f + f)(1 + \delta - c_n - c_r + \lambda f - f)}{2(1 + 3\delta)}$.

当 $c_r \leq 1 + \delta - c_n - v + d$, $f^* = 0$; 当 $c_r > 1 + \delta - c_n - v + d$, 由 $\frac{\partial \pi_G^{PG}}{\partial f} = 0$ 得 $f^* = \frac{v - d + c_n + c_r - \delta + 1}{2(\lambda - 1)^2}$. 当 λ 等于或接近 1 时, 在本文设置的参数范围内该式不成立或不符合实际, 因此最优解为 $f^* = 0$. 将 $f^* = 0$ 分别代入 $\theta^{PG*}(f)$ 、 $Q_n^{PG*}(\theta^{PG}, f)$ 的表达式, 可得 1) 当 $c_r \leq \frac{3\delta c_n + 2\delta^2 - \delta}{2(1 + \delta)}$ 时, $\theta^{PG*} = \frac{3\delta c_n - 2(1 + \delta)c_r + \delta(2\delta - 1)}{2 + 5\delta}$, $Q_n^{PG*} = \frac{1 + \delta - c_n - c_r}{2 + 5\delta}$, $Q_r^{PG*} = \frac{1 + \delta - c_n - c_r}{2 + 5\delta}$; 2) 当 $\frac{3\delta c_n + 2\delta^2 - \delta}{2(1 + \delta)} < c_r \leq \frac{\delta^2 + \delta c_n}{1 + \delta}$ 时, $\theta^{PG*} = 0$, $Q_n^{PG*} = \frac{1 - c_n}{2(1 + \delta)}$, $Q_r^{PG*} = \frac{1 - c_n}{2(1 + \delta)}$; 3) 当 $c_r > \frac{\delta^2 + \delta c_n}{1 + \delta}$ 时, $f^* = \frac{3\delta(1 + \delta)c_r - c_n - \delta^2}{\delta + \lambda + \lambda\delta}$, $\theta^{PG*} = 0$, $Q_n^{PG*} = \frac{\delta + \lambda - \lambda c_n - c_r}{\delta + \lambda + \lambda\delta}$, $Q_r^{PG*} = \frac{\delta + \lambda - \lambda c_n - c_r}{\delta + \lambda + \lambda\delta}$.

2) 当 $Q_n^{PG} \in \left(\frac{\delta - c_r - \theta^{PG} + \lambda f}{3\delta}, \frac{\delta - c_r - \theta^{PG} + \lambda f}{\delta}\right]$ 时, $\pi_M^{PG} = -(1 - \frac{\delta}{2})(Q_n^{PG})^2 + \left(\frac{2 - \delta + c_r - 2c_n - \lambda f - 2f}{2}\right)Q_n^{PG} + \frac{\theta^{PG}(-\theta^{PG} + \delta - c_r + \lambda f)}{2\delta}$. 由 $\frac{\partial \pi_M^{PG}}{\partial Q_n^{PG}} = 0$, $\frac{\partial \pi_M^{PG}}{\partial \theta^{PG}} = 0$ 得到 $Q_n^{PG*} = \frac{2 - \delta + c_r - 2c_n - (\lambda + 2)f}{4 - 2\delta}$, $\theta^{PG*} = \frac{\delta - c_r + \lambda f}{2}$, ($c_r \leq \delta + \lambda f$), $\theta^{PG*} = 0$ ($c_r > \delta + \lambda f$). 当 $c_r \leq \delta + \lambda f$, 由 $\frac{\partial \pi_G^{PG}}{\partial f} = 0$ 得 $f^* = \frac{\delta[2 - \delta + (\lambda + 2)(d - c_n)] + (\delta + \lambda)(v + c_r)}{2(2\delta + 2\delta\lambda + \lambda^2)} = f_{III}^*$.

令 $c_{r2}^{PG} = \delta + \lambda f_2 = \frac{2\delta(2\delta + 2\delta\lambda + \lambda^2) + \delta\lambda[2 - \delta + (\lambda + 2)(d - c_n)] + \lambda(\delta + \lambda)(v + c_r)}{2(2\delta + 2\delta\lambda + \lambda^2)}$ 将 f^* 代入各变量表达式得: 当 $c_r \leq c_{r2}^{PG}$ 时, $\theta^{PG*} = \frac{\delta - c_r + \lambda f_{III}^*}{2}$, $Q_n^{PG*} = \frac{2 - \delta + c_r - 2c_n + (\lambda - 2)f_{III}^*}{2(2 - \delta)}$, $Q_r^{PG*} = \frac{\delta c_n - c_r + (\lambda + \delta)f_{III}^*}{2\delta(2 - \delta)}$. 此时满足 $0 \leq Q_r^{PG} \leq Q_n^{PG}$ 的成本区间为 $c_{r1}^{PG} < c_r \leq c_{r3}^{PG}$ 其中 $c_{r1}^{PG} = \{[\lambda^2(\delta - 1) + (\lambda + 1)\delta^2]v + \delta(\lambda + 2)[\lambda(\delta - 1) + \delta]d + \delta[\lambda^2(3 - \delta) + \lambda(\delta + 2) + 2\delta]c_n + \delta(\delta - 2)[2\lambda^2 + \lambda(3\delta + 1) + 3\delta]\} / \{(\delta - 1)\lambda^2 + \delta(\lambda + 1)(3\delta - 4)\}$, $c_{r3}^{PG} = \frac{\delta(\lambda + \delta)[\lambda(\lambda + 2)d - \delta + 2] + \delta[3\lambda^2 + (5\delta + 2)\lambda + 6\delta]}{\lambda^2 + 2\delta\lambda - \delta^2 + 4\delta}$. 当 $c_r > c_{r2}^{PG}$ 将各变量表达式代入 π_G^{PG} 中, 由 $\frac{\partial \pi_G^{PG}}{\partial f} = 0$ 得 $f^* = \frac{\delta[(\lambda + 2)(d - c_n) + (2 - \delta)(2 - \lambda)] + (2\delta - \lambda\delta + 4\lambda)(v + c_r)}{2(4\delta + 4\delta\lambda + 4\lambda^2 - \delta\lambda^2)} = f_{II}^*$. 将 f_{II}^* 代入 Q_n^{PG*} 、 Q_r^{PG*} 的表达式可得, 当 $c_r > c_{r2}^{PG}$, $Q_n^{PG*} = \frac{2 - \delta + c_r - 2c_n - (\lambda + 2)f_{II}^*}{2(2 - \delta)}$, $Q_r^{PG*} = \frac{2\delta c_n - (4 - \delta)c_r + (2\delta + 4\lambda - \lambda\delta)f_{II}^* + \delta(2 - \delta)}{4\delta(2 - \delta)}$. 此时满足 $0 \leq Q_r^{PG} \leq Q_n^{PG}$ 的成本区间为 $c_r \leq c_{r4}^{PG}$, 其中 $c_{r4}^{PG} = \frac{[2\delta + (4 - \delta)\lambda]^2 v + \lambda^2(4\delta - \delta^3)[2(d + c_n + 1) - \delta] + 4\lambda\delta[4d + 4(\delta - 1)c_n - \delta^2 + 4] + 4\delta^2[2d + 2c_n - 3\delta + 6]}{\lambda(4 - \delta)[\lambda(4 - \delta) + 4\delta] + 12\delta^2(2 - \delta)}$.

3) 当 $Q_n^{PG} \in \left(\frac{\delta - c_r - \theta + \lambda f}{\delta}, 1\right)$ 时, $\pi_M^{PG} = -(Q_n^{PG})^2 + (1 - c_n - f)Q_n^{PG}$, 由 $\frac{\partial \pi_M^{PG}}{\partial Q_n^{PG}} = 0$ 得: $Q_n^{PG*} = \frac{1 - c_n - f}{2}$. 将上述表达式代入 π_G^{PG} 中可得 $\pi_G^{PG} = \frac{-f^2 + (d + 1 - c_n)f - (1 - c_n)d}{2}$. 由 $\frac{\partial \pi_G^{PG}}{\partial f} = 0$ 得 $f^* = \frac{1 + d - c_n}{2}$. 将 f^* 代入 $Q_n^{PG*} = \frac{1 - c_n - f}{2}$ 得 $Q_n^{PG*} = \frac{1 - c_n - d}{4}$.

总结以上并作进一步求解可得相应成本区间下各变量、企业利润以及回收率的表达式如表 5 所示.